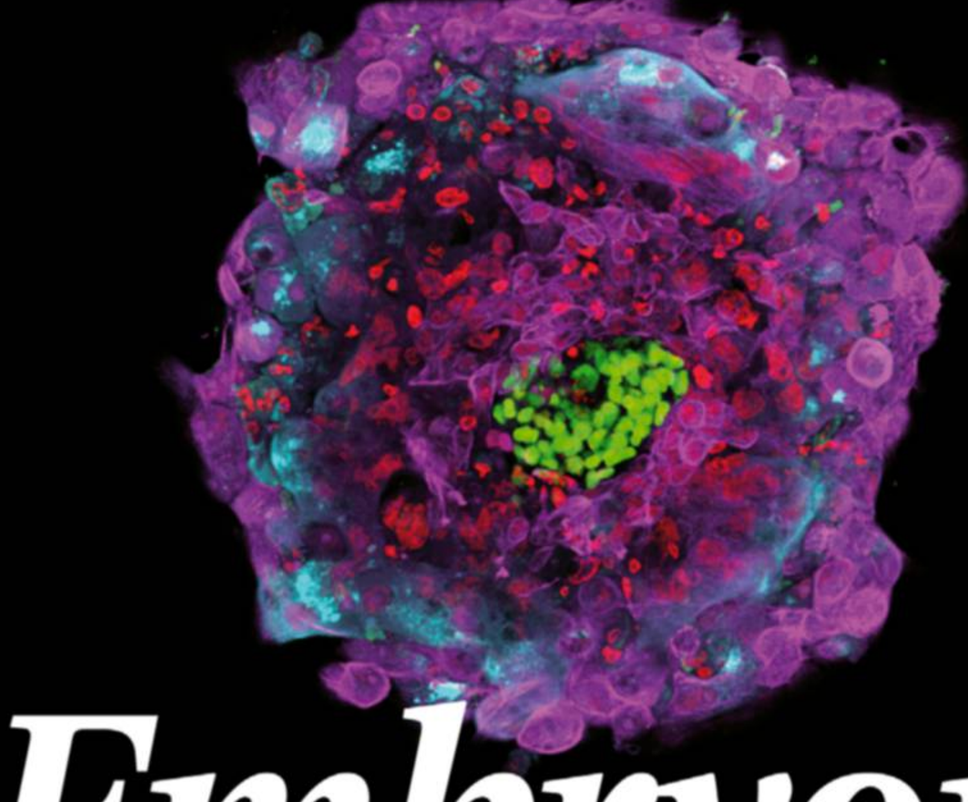
Entretien avec Takaaki Kajita
Prix Nobel de physique



La Recherche

La Recherche

www.larecherche.fr



Embryon

5 révélations sur les premiers instants de la vie

Division • Héritage parental • Défenses immunitaires...

DÉCEMBRE 2016 DOM 7,40 € - BEL 7,40 € - LUX 7,40 € - ALL 8,20 € - ESP 7,40 € - GR 7,40 € - ITA 7,40 € - PORT.CONT 7,40 €
CAN 10,5 $ CAN - CH 12,40 FS - MAR 63 DH - TUN 6,50 TND - MAYOTTE 8,80 € - TOM SURFACE 970 XPF - TOM AVION 1620 XPF

M 01108 - 518 - F: 6,40 € - RD





Ceci n'est pas une fleur

C'est une image exceptionnelle que nous avons choisie pour la couverture ce mois-ci. Rien de moins qu'un des grands clichés de l'année 2016 : un embryon humain de 12 jours (au centre, en vert), entouré des cellules qui formeront bientôt le placenta (en magenta et bleu). Pourquoi s'ébaubir devant ce cliché, me demanderez-vous ? Parce qu'il constitue une prouesse en soi : cet embryon a été cultivé in vitro bien au-delà de ce que l'on savait faire jusqu'à présent, 12 jours contre 7 habituellement (lire notre article p. 50). D'autres de ses congénères ont même atteint les 14 jours de culture (précisons que ces embryons, donnés à la science par des couples qui n'avaient plus pour eux de projet parental, n'ont pas été implantés dans un utérus).

LA BIOLOGISTE MAGDALENA ZERNICKA-GOETZ, de l'université de Cambridge, à l'origine de ce défi, n'a pas cherché à repousser les limites de la culture in vitro pour le plaisir d'aller plus loin. Ce faisant, elle va aider les chercheurs à comprendre ce qui se joue dans une période clé de la vie embryonnaire. Elle va faire avancer la recherche fondamentale, donc, mais aussi la recherche appliquée. Comment améliorer la fécondation in vitro ? Pour quelles raisons certains embryons ne s'implantent-ils pas dans l'utérus ? Comment expliquer les fausses couches ? Toutes ces questions et bien d'autres vont pouvoir être explorées sous un jour nouveau.

PARMI LES AUTRES SUJETS D'EXALTATION de ce numéro, il faut évidemment citer les découvertes réalisées par les lauréats du prix La Recherche. Chaque année, notre magazine met à l'honneur 12 publications francophones marquantes, dans 11 disciplines scientifiques. Ces travaux ont été patiemment évalués par un aréopage de 22 chercheurs et chercheuses – un grand merci à eux ! Puis la rédaction, soutenue par son éminente marraine, la microbiologiste Pascale Cossart, en a extrait la substantifique moelle. Une sorte de tour de France de l'excellence scientifique, que vous retrouverez dans les prochains numéros. Ce mois-ci, vous découvrirez comment une équipe parisienne a rendu un robot capable de trouver la meilleure démarche en cas de panne, comment un laboratoire caennais a instillé la chimie propre dans le raffinage du pétrole et enfin comment d'autres chercheurs parisiens interprètent les étranges images d'un tout nouvel instrument chilien pointé sur une lointaine étoile.
Très bonne lecture.

SOPHIA PUBLICATIONS: 8, rue d'Aboukir 75002 Paris. Tél.: 01 70 98 19 19 • **e-mail rédaction:** courrier@larecherche.fr • Pour joindre directement par téléphone un membre de la rédaction, composez le 01 70 98, suivi des quatre chiffres placés après son nom. Par mail, libellez l'adresse sur le modèle : initiale du prénom suivi du nom@sophiapublications.fr (sans accents).

Pour toute question concernant votre abonnement: 01 55 56 70 56 • **Adresse:** *La Recherche,* 4 rue de Mouchy 60438 Noailles Cedex. **Tél.:** 01 55 56 71 15. • **ABONNEMENTS: Tarif France:** 1 an 10 nos + 1 n° double 67 euros. 1 an 10 nos + 1 n° double + 4 hors-séries 89 euros. **Tarif international:** nous contacter. **E-mail:** abo.recherche@groupe-gli.com • **Suisse:** Edigroup. Tél.: (0041) 22860 84 01 • **Belgique:** Edigroup. Tél.: (0032) 70233304 • **Achat de revues et d'écrins *La Recherche*** – BP65 – 24, chemin latéral 45390 Puiseaux. **Tél. :** 02 38 33 42 89

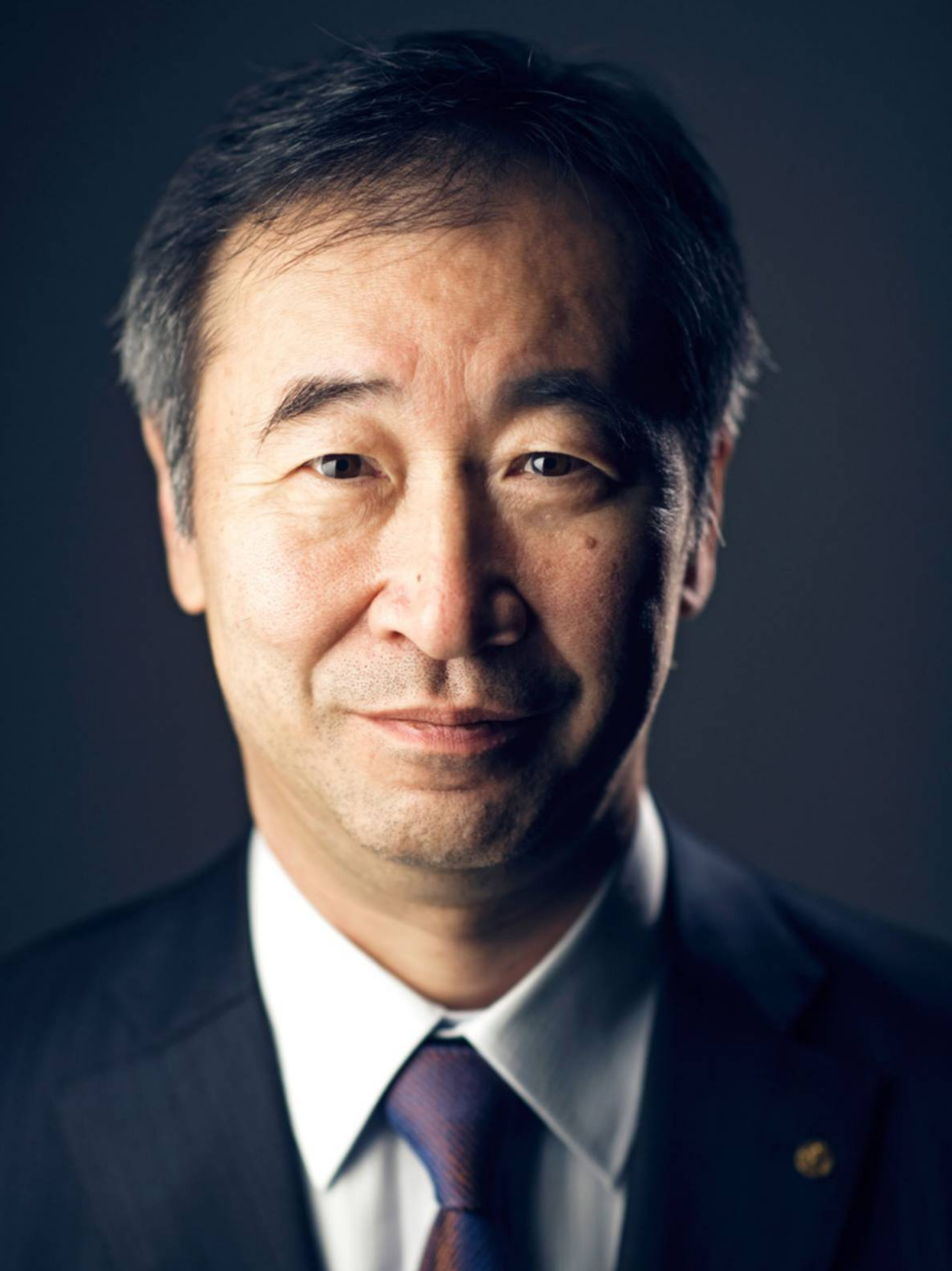
La Recherche est publiée par Sophia Publications, filiale de Sophia Communications • **Président-directeur général et directeur de la publication:** Claude Perdriel, assisté de Nelly Chirio (19 70) • **Directeur éditorial:** Maurice Szafran • **Directeur délégué:** Jean-Claude Rossignol • **Rédactrice en chef:** Sophie Coisne • **Rédactrice en chef technique:** Catherine Caltaux • **Conception graphique:** Dominique Pasquet • **Assistante:** Gabrielle Monrose (19 06) • **Chef des informations:** Philippe Pajot (19 29) • **Chefs de rubrique:** Hervé Cabibbo (19 30), Mathias Germain (19 33) • **Rédacteurs:** Gautier Cariou (19 31), Vincent Glavieux (19 32), Bérénice Robert (19 34), Sylvain Guilbaud (19 38) • **Directrice artistique:** Maryvonne Marconville (19 28) • **Service photo:** Claire Balladur (19 41) • **Secrétaire de rédaction:** Véronique Fuvel (19 36) • **Ont collaboré à ce numéro:** Grégoire Ader, Michèle Bourgeois, Antoine Cappelle • **Responsable fabrication:** Christophe Perrusson (19 10) • **Activités numériques:** Bertrand Clare (19 08) • **Ressources humaines:** Agnès Cavanié (19 71) • **Communication:** Nelly Chirio (19 70) • **Directeur des ventes et promotion:** Valéry-Sébastien Sourieau (19 11) • **Vente messageries VIP-diffusion:** Frédéric Vinot • numéro vert 0800 51 49 74 • **Responsable gestion abonnements:** Isabelle Parez (19 12) • **Responsable du marketing direct:** Linda Pain (19 14) • **Responsable administratif et financier:** Vincent Gentric (19 18) • **Comptabilité:** Teddy Merle (19 15) • **Diffusion librairies :** Pollen DIF'POP'. Tél.: 0143620807 Fax: 0172718451 • **Régie publicitaire:** Médiaobs 44, rue Notre-Dame-des-Victoires 75002 Paris. Tél.: 0144889770. Fax: 0144889779 • e-mail: pnom@mediaobs.com • **Pour joindre directement une personne,** composez le 01 44 88, suivi des quatre chiffres placés après son nom. • **Directeur général:** Corinne Rougé (93 70) • **Directeur commercial:** Jean-Benoît Robert (97 78) • **Directeur du pôle Sciences:** Sylvain Mortreuil (97 75) • **Partenariats:** Karine Grossman (89 08) • **Studio/Maquette/Techniques:** Cédric Aubry (89 05) • **Imprimerie:** G. Canale & C., Via Liguria 24, 10071 Borgaro (TO), Italie. Dépôt légal à parution.





 Commission paritaire: 0919 K 85863. ISSN 0029-5671. CRÉDIT COUVERTURE: GIST CROFT, ALESSIA DEGLINCERTI, ALI H. BRIVANLOU/ THE ROCKEFELLER UNIVERSITY - AFP

GIL LEFAUCONNIER



entretien avec

Takaaki Kajita

Les neutrinos sont des particules élémentaires très difficiles à détecter. On pensait d'ailleurs qu'elles avaient une masse nulle, jusqu'à ce que les travaux du physicien japonais Takaaki Kajita ne montrent le contraire. Une découverte récompensée par le prix Nobel de physique en 2015.

“Les neutrinos expliqueront peut-être pourquoi la matière domine l'antimatière”

Propos recueillis par Sylvain Guilbaud

NOBEL MEDIA AB/ALEXANDER MAHMOUD

◄ *Takaaki Kajita, directeur de l'Institut de recherche sur les rayons cosmiques, est responsable de Kagra, un détecteur d'ondes gravitationnelles en cours de construction au Japon.*

Takaaki Kajita est un homme discret qui affiche une tranquillité souriante. Il s'exprime avec la concision et l'humilité souvent propres aux scientifiques. Mais ce portrait rapide ne doit pas masquer la ténacité dont il a fait preuve avec ses collaborateurs dans l'étude des neutrinos, eux aussi très discrets. Il a fallu construire des détecteurs gigantesques pour traquer ces particules élémentaires, dont il existe plusieurs familles. Les travaux de Takaaki Kajita ont mis en évidence le caractère « transformiste » des neutrinos, capables de changer de famille au cours de leur déplacement. Cela lui a valu le prix Nobel de physique 2015. Cette oscillation des neutrinos implique qu'ils ont une masse, ce que le modèle standard de la physique des particules n'explique pas. La compréhension de ce phénomène pourrait éclairer certains des grands mystères de l'Univers. Aujourd'hui, ce sont d'autres signaux de l'Univers qui intéressent le physicien : les ondes gravitationnelles.

La Recherche **Que sont les neutrinos et pourquoi sont-ils si fascinants ?**

Takaaki Kajita Les neutrinos sont des particules élémentaires, comme les quarks ou les électrons. À la différence de ces derniers, ils ne possèdent pas de charge électrique et interagissent très peu avec la matière. Pour cette raison, ils nous traversent très facilement ainsi que la Terre sans produire le moindre effet. Nous connaissons trois familles de neutrinos : les neutrinos électroniques, muoniques et tauiques. En physique, nous appelons ces familles des « saveurs ». Ces particules sont produites en des endroits divers de l'Univers : dans l'atmosphère terrestre, au centre du Soleil ou dans des endroits plus éloignés de l'Univers. Les neutrinos atmosphériques, que j'ai étudiés en particulier, sont produits lorsque des rayons cosmiques venus de l'espace rencontrent des noyaux d'atomes dans l'atmosphère terrestre. Cela produit de nouvelles particules, qui se désintègrent successivement en •••



1959 Naissance de Takaaki Kajita à Higashimatsuyama, au Japon.
1986 Soutient sa thèse sur la recherche de la désintégration des nucléons avec l'expérience Kamiokande.
1988 Nommé chercheur assistant à l'Institut de recherche sur les rayons cosmiques (ICRR) de l'université de Tokyo. Il travaille à la conception de l'expérience Super-Kamiokande.
1998 Publication de la découverte de l'oscillation des neutrinos.
2008 Nommé directeur de l'ICRR.
2015 Reçoit le prix Nobel de physique avec l'Américain Arthur McDonald pour la mise en évidence de l'oscillation des neutrinos.

••• cascade, donnant notamment des neutrinos. Le modèle standard, qui explique comment agissent les particules et décrit les interactions fondamentales (*) qui les relient, est très efficace, mais il prédit que les neutrinos n'ont pas de masse. Or nous avons constaté expérimentalement qu'ils en ont bien une! Cependant, cette masse est si petite (on ne sait pas encore bien l'estimer) que cela fait des neutrinos des particules très différentes des quarks par exemple. Pourquoi sont-ils si spéciaux? Je ne sais pas, mais il doit bien y avoir une raison. C'est pourquoi il y a encore du travail à réaliser sur les neutrinos. Je crois que cela peut être la clé pour comprendre la physique à la plus petite échelle.

Pourquoi avez-vous choisi de vous pencher sur ces questions?

Quand j'étais jeune, j'ai été très attiré par la façon dont la physique tentait d'appréhender le monde: partir de principes de base, faire des expériences et essayer d'en tirer des conclusions sur l'Univers. Dans les années 1970, alors que j'étais étudiant, les physiciens théoriciens tentaient d'unifier les interactions électromagnétiques, faible et forte. Leur théorie prédisait que les protons et les neutrons doivent se désintégrer après des temps de vie de l'ordre de 10^{28} à 10^{32} années. Ce sont des durées considérables (des milliards et des milliards de fois l'âge de l'Univers), mais en observant de très grandes quantités de ces particules, il devrait être possible de mesurer quelques désintégrations par an. C'était l'objectif de l'expérience Kamiokande, que j'ai rejointe pour effectuer ma thèse de doctorat sous la direction de Masatoshi Koshiba (Prix Nobel de physique 2002).

Quel est le lien avec les neutrinos?

Nous cherchions à mesurer de très rares désintégrations de protons. Il fallait donc s'affranchir de tous les autres signaux pour ne pas être parasité. Ainsi, le détecteur a été construit à Kamioka, entre Tokyo et Osaka, sous une montagne, pour arrêter au maximum les particules en provenance de l'atmosphère, comme les muons. En revanche, les neutrinos ne sont pas entravés par cet obstacle. Ils peuvent arriver au niveau du détecteur et créer des signaux. Pour éliminer ce signal d'arrière-plan à la désintégration des protons, il fallait donc être capable de mesurer précisément ces neutrinos atmosphériques. Ces particules ont dès lors commencé à susciter beaucoup d'intérêt alors qu'elles avaient été détectées quinze ans plus tôt.

À quoi ressemblait l'expérience Kamiokande?

Imaginez un immense réservoir de 16 mètres sur 16 mètres placé dans une caverne que nous avons creusée sous la montagne. Ce réservoir a été rempli progressivement avec 3000 m³ d'eau. Perchés sur des bateaux pneumatiques, nous tapissions la totalité des murs du réservoir avec des tubes photomultiplicateurs destinés à capter de très faibles flashs lumineux. Ils permettaient de détecter indirectement une éventuelle désintégration de proton et les neutrinos: de temps en temps, un neutrino interagit avec l'eau en transférant son énergie à un lepton chargé (*), lequel se déplace alors plus vite que la lumière dans l'eau et émet des photons. C'est l'effet Cherenkov. Avec nos casques, nous ne ressemblions pas à l'image que les gens se font des scientifiques. Mais c'est une part importante du travail des physiciens expérimentateurs que de construire des détecteurs. Nous étions seulement une dizaine de personnes. Cela m'a beaucoup plu. Une fois la construction de Kamiokande achevée, la prise de données a pu commencer.

Avez-vous observé des désintégrations de protons?

Non! Nous n'avons rien vu de ce côté. Mais après avoir terminé ma thèse, je me suis replongé dans le logiciel qui analysait les données de l'expérience de Kamiokande dans le but de l'améliorer, en particulier pour être capable de différencier le flash lumineux qui provient d'un neutrino muonique de celui provoqué par un neutrino électronique. J'ai d'abord testé les changements que j'avais effectués en mesurant un phénomène connu, à savoir la fréquence de détection de chacune de ces deux saveurs de neutrinos. Lorsqu'un rayon cosmique provoque la création de neutrinos dans l'atmosphère, il y a deux neutrinos muoniques créés pour un neutrino électronique. Je m'attendais donc à observer plus de neutrinos muoniques, mais ce n'était pas le cas! Il y avait un déficit dans le nombre de neutrinos muoniques.

Quelle a été votre réaction?

Je me suis dit que j'avais fait une erreur quelque part, en modifiant le logiciel d'analyse des données. Pendant un an, j'ai cherché cette erreur. Mais il n'y en avait pas. Nous avons donc publié un article expliquant que nous observions un déficit de neutrinos muoniques. Nous y concluions qu'une explication possible était « l'oscillation » des neutrinos (1).

De quoi s'agit-il?

C'était une hypothèse théorique formulée au début des années 1960 notamment par le physicien italien Bruno Pontecorvo et les physiciens japonais Ziro Maki, Masami Nakagawa et Shoichi Sakata (2). Selon cette hypothèse, les neutrinos changent de

saveur au fur et à mesure qu'ils se déplacent, puis reprennent leur saveur d'origine, etc. Ainsi, un neutrino muonique produit dans l'atmosphère pourrait se transformer en neutrino tauique. Cela pouvait expliquer pourquoi nous observions moins de neutrinos muoniques que prévu.

Vous avez donc tenté de confirmer ce changement de saveur des neutrinos avec Kamiokande ?

Nous avons essayé. Mais il s'est avéré que Kamiokande n'était pas adaptée pour cela. Nous n'observions qu'une centaine de neutrinos atmosphériques par an. C'était trop peu pour prouver l'oscillation des neutrinos. Il nous fallait un détecteur plus grand, avec plus d'eau pour espérer capter plus de ces particules. Nous avons donc remis nos casques pour construire une expérience similaire mais vingt fois plus grande : Super-Kamiokande. Avec 50 000 m^3 dans une caverne de plus de 30 mètres sur 30, nous pouvions détecter 10 neutrinos par jour. Une des difficultés fut de s'assurer de la pureté de l'eau. Si elle n'était pas parfaitement transparente, les flashs lumineux risquaient de trop s'atténuer avant d'être captés. Le principe, pour prouver l'oscillation des neutrinos, repose sur le fait que les neutrinos qui sont créés dans la couche d'atmosphère située au-dessus de Super-Kamiokande n'ont pas le temps de changer de saveur pendant la dizaine de kilomètres de trajet jusqu'au détecteur, tandis que les neutrinos créés aux antipodes, et qui traversent sans problème l'intérieur de la Terre, parcourent plus de 10 000 kilomètres et ont le temps de se transformer. Ainsi, si l'oscillation existe bel et bien, nous nous attendions à observer un déficit de neutrinos muoniques pour les neutrinos arrivant « par en dessous », mais pas pour ceux arrivant « par au-dessus ». Il est possible de connaître le sens d'arrivée des neutrinos, car les flashes lumineux sont émis dans le même sens que leur sens d'arrivée. La construction de Super-Kamiokande a duré cinq ans. Nous avons commencé les mesures en 1996. En 1998, les résultats étaient là : l'oscillation des neutrinos était un phénomène bien réel **(3)**.

Comment vit-on une telle découverte ?

J'étais vraiment excité de voir ce phénomène se matérialiser. Ce résultat a aussi été trouvé par Arthur McDonald (colauréat du prix Nobel de physique 2015, NDLR) et son équipe avec l'expérience SNO (Sudbury Neutrino Observatory, NDLR), qui détectait, elle, des neutrinos en provenance du Soleil **(4)**. Surtout, le fait que les neutrinos oscillent entre les différentes saveurs implique qu'ils ont une masse.

Quel est le lien entre la masse des neutrinos et le fait qu'ils oscillent ?

Pour le dire de façon simplifiée, si les neutrinos n'avaient pas de masse, ils se déplaceraient à la vitesse de la lumière, comme les photons par exemple. Or, des particules qui se déplacent à la vitesse de la lumière ne voient littéralement pas le temps passer. Elles sont immuables. Mais si les particules ont une masse, alors elles se déplacent moins vite que la lumière et cela rend possible des changements, comme des oscillations par exemple. Les neutrinos changent, donc ils ont une masse. Mais celle-ci est minuscule : dix milliards de fois plus faible que la masse des quarks ou des électrons. En fait, il existe trois états de masse différents (bien que très proches) pour les neutrinos. Mais ces trois états de masse ne coïncident pas avec les trois saveurs (électronique, muonique ou tauique). Cela signifie

“ Pourquoi les neutrinos sont-ils si spéciaux, si différents des quarks par exemple ? Je ne sais pas, mais il doit bien y avoir une raison ”

qu'un neutrino électronique, par exemple, ne correspond pas à une masse particulière. On dit qu'il se trouve dans une superposition quantique des trois différents états de masse. C'est un mélange dont nous cherchons à mieux connaître tous les paramètres. Il ne faut pas oublier que le modèle standard n'explique pas la masse des neutrinos.

Y a-t-il des pistes pour expliquer pourquoi la masse des neutrinos est si faible ?

Oui. La principale hypothèse est le mécanisme de la balançoire (*seesaw mechanism*, en anglais). Selon cette hypothèse, il existerait un ou plusieurs neutrinos très lourds, qui expliqueraient, par symétrie, l'existence des neutrinos très légers que l'on observe. Avec cette hypothèse, les neutrinos expliqueront peut-être pourquoi la matière domine l'antimatière dans l'Univers. C'est une des grandes énigmes de la physique aujourd'hui.

En quoi consiste l'énigme de la matière et de l'antimatière ?

L'antimatière ressemble beaucoup à la matière, à ceci près qu'elle possède une charge électrique opposée. Par exemple, un antiélectron possède les mêmes caractéristiques qu'un électron, mais •••

(*) Les interactions fondamentales sont les quatre forces qui régissent l'Univers. Ce sont les interactions forte et faible, qui sont les deux forces nucléaires, l'interaction électromagnétique, qui décrit notamment la lumière, et la gravité, la seule force qui n'est pas décrite par le modèle standard.

(*) Les leptons chargés sont des particules élémentaires qui ne sont pas sensibles à l'interaction forte et qui possèdent une charge électrique, par exemple l'électron.

••• il est chargé positivement. On l'appelle d'ailleurs aussi « positron ». Chaque particule de matière possède ainsi une jumelle d'antimatière. Lorsque les deux se rencontrent, elles s'annihilent sous forme d'énergie. Dans l'Univers actuel, nous n'observons quasiment pas d'antimatière. Or, d'après la théorie actuelle, le Big Bang a entraîné l'apparition d'autant d'antimatière que de matière. En toute logique, les deux auraient dû s'annihiler entièrement pour ne laisser derrière elles que de l'énergie. Pourtant, la matière a survécu. Il devait y avoir un déséquilibre, très faible, dès le départ. Pour donner une idée des proportions, les physiciens estiment que pour un milliard d'antiprotons présents juste après le Big Bang, il y avait un milliard et un protons. Le milliard d'antiprotons se seraient désintégrés avec le milliard de protons, et un proton aurait survécu. Cette

“ Les ondes gravitationnelles sont très intéressantes pour nous aider à comprendre les trous noirs ou les supernovae ”

asymétrie permettrait de comprendre pourquoi la matière domine dans l'Univers d'aujourd'hui. Mais quelle est l'origine de ce déséquilibre initial dans le nombre de particules ? S'il existait aussi des neutrinos lourds à l'époque, avec leurs jumeaux antineutrinos, une asymétrie dans leur désintégration aurait pu donner un avantage à la matière.

Quelles sont aujourd'hui les expériences menées sur les neutrinos ?

Il y en a beaucoup. Pour en citer seulement quelques-unes, il y a l'instrument IceCube au pôle Sud. C'est l'un des plus gros détecteurs de neutrinos en service à l'heure actuelle : il occupe un volume d'un kilomètre cube sous la glace antarctique. Cet instrument a fait des mesures intéressantes, notamment en détectant des neutrinos cosmiques, qui proviennent de l'extérieur du Système solaire. Cette année, l'équipe d'IceCube a annoncé n'avoir pas détecté de neutrinos stériles (5), qui étaient une quatrième famille de neutrinos imagés par certains théoriciens pour expliquer notamment le déséquilibre matière-antimatière. Je ne suis pas surpris par ce « non-résultat », mais il ne signifie pas que les neutrinos stériles n'existent pas. Il faut continuer à les chercher. Une autre collaboration internationale sur les neutrinos se nomme T2K et utilise le détecteur Super-Kamiokande. L'objectif est d'observer l'éventuelle différence de comportement entre les oscillations de neutrinos et d'antineutrinos, ce qui pourrait nous renseigner sur l'asymétrie entre matière et antimatière. Les résultats préliminaires présentés cette année sont encourageants. Enfin, d'autres grands projets sont encore en attente de financement, dont Hyper-Kamiokande, au Japon, qui pourrait être dix fois plus grand que Super-Kamiokande.

Vous vous intéressez désormais aux ondes gravitationnelles, pourquoi ?

La première détection directe d'ondes gravitationnelles, des vibrations de l'espace-temps prédites par Einstein, annoncée par la collaboration Ligo-Virgo cette année, est une grande découverte. À la manière des neutrinos cosmiques, les ondes gravitationnelles sont des signaux très intéressants pour nous aider à comprendre les phénomènes qui se produisent loin dans l'Univers, tels les trous noirs ou les supernovae. Il est clair que les ondes gravitationnelles sont la nouvelle fenêtre pour étudier l'Univers. Auparavant, nous n'utilisions que les ondes électromagnétiques, la lumière. Nous entrons dans l'ère de l'astronomie « multimessager ». Je suis maintenant le responsable de Kagra, un détecteur d'ondes gravitationnelles que nous sommes en train de construire au Japon. Dans deux ans, nous comptons commencer les réglages afin d'avoir une sensibilité suffisante pour détecter les signaux d'ondes gravitationnelles dans trois ou quatre ans. Le but sera de partager les données avec les détecteurs Ligo et Virgo afin d'avoir un véritable réseau d'observation.

Quel est le prochain grand mystère que vous aimeriez voir résoudre ?

Celui de la matière noire, qui compose plus de 25 % du contenu en énergie de l'Univers sans que l'on connaisse sa nature. Ce qui est sûr, c'est que ce n'est pas un élément du modèle standard et que les neutrinos n'en sont pas le constituant. Il y a encore d'autres mystères, et les jeunes physiciennes et physiciens que j'ai rencontrés cette année à Lindau (en Allemagne, où se réunissent chaque année Prix Nobel et jeunes chercheurs, NDLR) sont très enthousiastes. La passion pour la physique permet de surmonter bien des difficultés. ■

(1) K. Hirata *et al, Phys. Lett. B, 205*, 416, 1988.
(2) Z. Maki *et al., Prog. Theor. Phys., 28*, 870, 1962.
(3) Y. Fukuda *et al., Phys. Rev. Lett., 81*, 1562, 1998.
(4) Q. R. Ahmad *et al., Phys. Rev. Lett., 87*, 07301, 2001.
(5) M. G. Aartsen *et al., Phys. Rev. Lett., 117*, 071801, 2016.

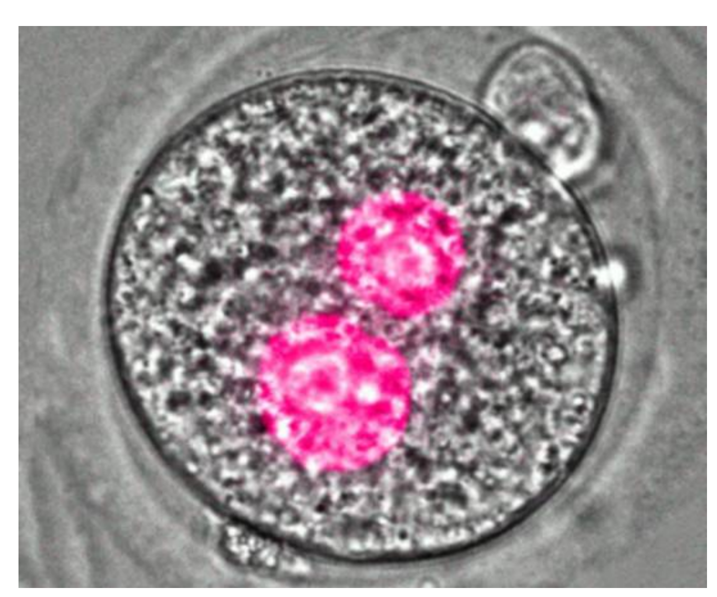
Pour en savoir plus

■ Matthew Chalmers, « La quête de la plus rare des désintégrations », *La Recherche*, n° 512, juin 2016, p. 60.

sommaire/décembre 2016 - n°518




▲ ÉVÉNEMENT

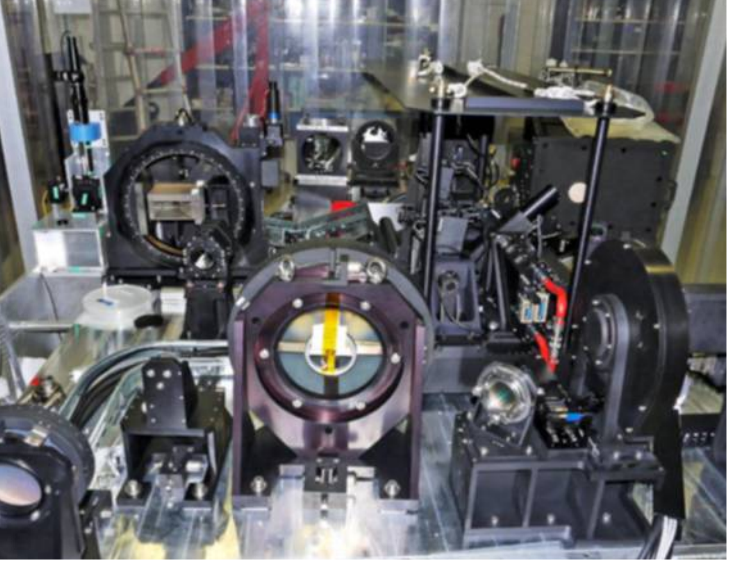


▲ DOSSIER

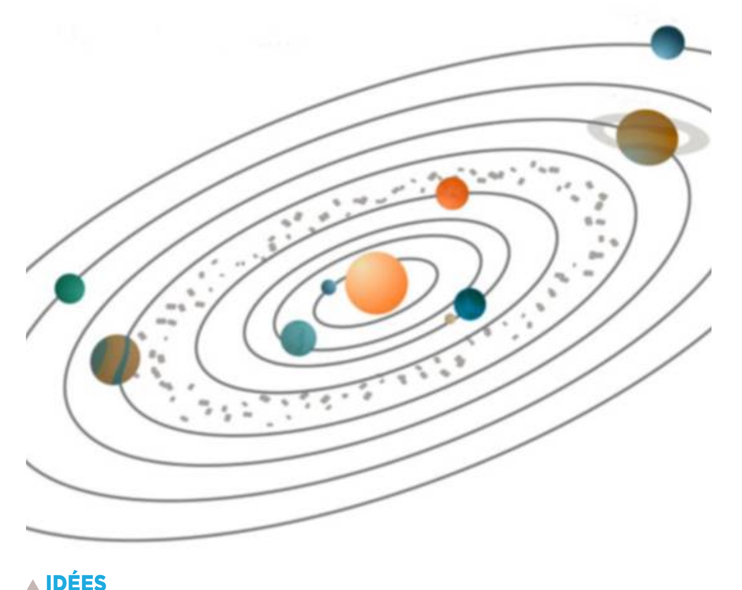
Retrouvez *La Recherche* sur RFI dans l'émission «Autour de la question», le 7 décembre à 15h



CULTURA/IMAGE SOURCE / BSIP - LABO VERLHAC



▲ FONDAMENTAUX



▲ IDÉES

54 fondamentaux

79 idées

92 guide

Ce numéro comporte un encart abonnement *La Recherche* sur les exemplaires kiosque France et étranger (hors Suisse et Belgique), un encart abonnement Edigroup sur les exemplaires kiosque Suisse et Belgique, un encart de *l'OBS* sur les exemplaires abonnés, un .quatre pages tout en un *Resto du cœur* sur les exemplaires abonnés.

ils ont participé à ce numéro



Julien Bourdet

JOURNALISTE

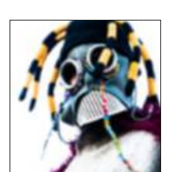
Après un début de carrière au *Figaro* à la rubrique Science, Julien Bourdet a collaboré avec de nombreux médias scientifiques. Ses domaines de prédilection : l'astronomie, les sciences de la Terre, l'espace et la physique. Sa passion : vulgariser les sciences auprès du grand public. ■



Roland Lehoucq

ASTROPHYSICIEN

Roland Lehoucq travaille au service d'astrophysique du CEA de Saclay, et il enseigne à l'École polytechnique et à Sciences Po. Auteur de nombreux livres de vulgarisation, il tient une rubrique scientifique dans la revue de science-fiction *Bifrost*. ■



Denis Delbecq

JOURNALISTE

Ancien physicien chercheur, Denis Delbecq a été rédacteur en chef adjoint au *Monde* et à *Libération*. Il travaille avec de nombreux médias grand public et scientifiques, sur des sujets liés à la science, l'environnement et la technologie. Il est aussi créateur d'applications à l'usage des journalistes. ■



Sylvie Nony

PROFESSEURE

Chercheuse associée au laboratoire Sphere de l'université Paris-Diderot et enseignante, Sylvie Nony est spécialiste de l'histoire de la physique arabe médiévale. Elle a publié *Les Variations du mouvement*, chez Ifao, consacré au médecin et philosophe Abu al-Barakat al-Baghdadi. ■



Oriane Dioux

JOURNALISTE

Après des études de biologie et de géologie, Oriane Dioux s'est tournée vers le journalisme avec l'envie de continuer à explorer le vaste domaine des sciences et avec la volonté de transmettre. Elle écrit régulièrement pour des magazines grand public tels que *La Recherche* et *Science & Vie Junior*. ■



Inès Safi

PHYSICIENNE

Titulaire d'un doctorat et d'une habilitation à diriger des recherches en physique théorique, polytechnicienne, Inès Safi a publié dans des revues internationales à fort impact. En parallèle, elle a intégré le groupe de recherche international Sciences et religion en islam. ■



François Euvé

THÉOLOGIEN

Physicien de formation, François Euvé est professeur de théologie au Centre Sèvres, à Paris, et rédacteur en chef de la revue catholique *Études*. Il tient un bulletin bibliographique sur l'histoire des sciences et les relations avec la théologie chrétienne dans la revue *Recherches de science religieuse*. ■



Marie-Émilie Terret

BIOLOGISTE

Après une thèse à l'université Pierre-et-Marie-Curie et un stage post-doctoral à l'Institut Sloan Kettering à New York, Marie-Émilie Terret rejoint l'Inserm en 2010. Elle travaille dans l'équipe Divisions asymétriques ovocytaires au Centre interdisciplinaire de recherche en biologie au Collège de France. ■



Marie-Christine de La Souchère

PROFESSEURE

Agrégée de physique, Marie-Christine de La Souchère a enseigné au lycée Jean-Baptiste-Say, à Paris. Elle partage sa passion des sciences en cultivant l'approche historique et l'anecdote. Son dernier livre, *Les Sciences et l'Art*, est paru aux éditions Ellipses. ■



Marie-Hélène Verlhac

BIOLOGISTE

Directrice adjointe du Centre de recherche interdisciplinaire en biologie au Collège de France, elle dirige l'équipe Divisions asymétriques ovocytaires. Élève de l'École normale supérieure de Lyon, elle a fait sa thèse à l'université Pierre-et-Marie-Curie et son stage post-doctoral à l'université de Californie. ■


Kinedo
FRANCE
Le plaisir de l'eau
FABRICATION FRANÇAISE

Adresse électronique : courrier@larecherche.fr

GÉOCHIMIE

L'ORIGINE DU SEL MARIN

Suite à votre article sur la montée des eaux (*La Recherche* n° 511, p. 20), je me demande d'où vient le sel présent dans les océans. La composition de la croûte terrestre est très éloignée de celle des minéraux de l'eau de mer, plus riche en chlorure et en sodium. D'où provient cet enrichissement ? Et depuis quand l'eau de mer a-t-elle cette composition ?

Frank Vancayemberg

Christophe Monnin, géochimiste **L'interprétation des archives sédimentaires et l'étude des volcans actuels nous apprennent que les ions chlorure ont été apportés à l'eau de mer par le dégazage des volcans lors de la formation des océans. Cela remonte à environ 4 milliards d'années. Le sodium, lui, provient de l'altération chimique des continents par les pluies acides, liées au dégazage de la Terre primitive. Mais la salinité de l'eau est la somme de tout ce qui y est dissous, pas seulement le chlorure de sodium. Chaque élément chimique a son cycle propre. La composition de l'eau de mer est le résultat des interactions entre les réservoirs géochimiques. Elle dépend donc de nombreux paramètres (climat, tectonique des plaques, etc.). Mais on considère, sans l'avoir pour l'instant prouvé, que la salinité a été constante à l'échelle des temps géologiques.**



« Pour sauver les abeilles, l'interdiction des pesticides ne suffit pas »

PRODUIRE SANS PESTICIDES

Pourquoi Yves Le Conte affirme-t-il que « *l'interdiction totale des pesticides est impossible* » (*La Recherche* n° 516, p. 36) ? Une étude menée par un département de l'Inra montre pourtant que la production de légumes est possible sans produits phytosanitaires, avec une rentabilité économique viable (1). À propos de la lutte contre le varroa, parasite mortel pour les abeilles, Yves Le Conte ne fait mention que de deux méthodes : le traitement chimique et la sélection des abeilles. Cependant, l'ouvrage *Apiculture alternative* de Maurice Chaudière propose un modèle de ruche permettant de l'éliminer sans produit chimique.

Benoît Gouin

(1) Collectif, « Maraîchage biologique permaculturel et performance économique », tinyurl.com/maraichage-bio, 2015.

Yves Le Conte, entomologiste **En l'état actuel, il est impossible de se passer complètement des pesticides : l'agriculture intensive, visant à nourrir une population croissante, en a besoin pour contrôler les pullulations de ravageurs qu'elle subit. Cependant, il faudrait en effet privilégier les techniques culturales évitant le recours aux produits phytosanitaires. Cette approche devrait être développée à chaque fois qu'elle est transposable et économiquement viable. De même, il existe des techniques d'élimination des varroas dans les colonies d'abeilles qui ne font pas usage des pesticides. Ce parasite se reproduit de préférence dans un couvain de mâles : il est donc possible de l'y piéger, puis de retirer le couvain de la ruche. Mais il s'agit d'une méthode chronophage et donc sans doute plus adaptée à l'apiculture de loisir.**

ASTROPHYSIQUE

PLANÈTES GAZEUSES

Votre article sur Jupiter (*La Recherche* n° 513-514, p. 92) m'interroge sur le concept de « planète gazeuse », dont je n'ai pas trouvé l'origine. Depuis quand sait-on que ces planètes n'ont pas une surface comme les planètes telluriques ?

Thierry Levaux

Tristan Guillot, astrophysicien **Avant le XXe siècle, on pensait que les planètes géantes étaient de même composition que la Terre, mais très chaudes, donc gazeuses. D'après la taille de Jupiter et sa masse, déduite du mouvement de ses lunes, Sir Harold Jeffreys calcule en 1923 qu'elle doit être en grande partie constituée d'hydrogène solide. La nature fluide de Jupiter n'est en fait découverte qu'en 1968. L'astrophysicien William B. Hubbard explique alors une idée émise deux ans plus tôt par Frank Low : la planète émet plus d'énergie qu'elle n'en reçoit du Soleil. Hubbard calcule la température de Jupiter d'après sa luminosité. Il conclut que l'excès d'énergie provient du refroidissement progressif de la planète. L'hydrogène y passe progressivement d'une atmosphère gazeuse à un intérieur liquide, hypothèse confirmée depuis.**

Sauf mention contraire de leur auteur, toute lettre parvenue à la rédaction de *La Recherche* est susceptible d'être éditée et publiée, en tout ou en partie, dans le journal. Les lettres concernant un auteur extérieur à la rédaction de *La Recherche* lui sont envoyées. Sans réaction de l'auteur dans un délai raisonnable, nous les considérons comme publiables en tout ou en partie, sans attendre une éventuelle réponse de sa part. Dans la mesure du possible, évitez les fax et les lettres manuscrites.

SALON DE l'Etudiant

AVEC LE PARRAINAGE DES



ÉTUDES & MÉTIERS D'AVENIR

DÉVELOPPEMENT DURABLE & ENVIRONNEMENT





Crédits photos : Fotolia

10 | 11 DÉCEMBRE

PARIS_ESPACE CHAMPERRET

CONFÉRENCES
ET RENCONTRES













Les neurones migrent après la naissance

Une étude montre que des neurones poursuivent leur migration pendant les tout premiers mois de la vie. Ces nouveaux neurones jouent probablement un rôle dans les mécanismes de plasticité qui permettent l'apprentissage.

Oriane Dioux, journaliste

Longtemps, la neuroscience a considéré que l'ensemble des neurones du cortex cérébral étaient déjà installés en réseau à la naissance. Le développement cérébral de l'enfant se poursuivait alors avec la formation de milliards de points de communication entre ces neurones – les synapses, à travers lesquelles sont libérées les molécules nécessaires à la transmission de l'influx nerveux –, et l'élagage des connexions inutilisées. Mais aucun nouveau neurone n'était intégré à ce réseau en cours de maturation. Les travaux de l'équipe d'Arturo Alvarez-Buylla, de l'université de Californie à San Francisco, chamboulent cette idée. Ils montrent qu'une population particulière de neurones, les interneurones, migre au sein du cortex frontal humain lors des tout premiers mois de la vie (1). L'idée d'une possible migration de neurones après la naissance n'est cependant pas nouvelle. Les indices se sont accumulés depuis une vingtaine d'années. À la fin des années 1990, des premiers travaux, auxquels Arturo Alvarez-Buylla avait déjà participé, ont d'abord mis en lumière la présence d'un fin courant de neurones dans le cortex de rongeurs. Ceux-ci quittaient une région logée en profondeur du cerveau, la zone sous-ventriculaire, et migraient les uns derrière les autres, formant comme un cordon qui rejoignait le bulbe olfactif (2). Cette structure est d'ailleurs irriguée en nouveaux neurones tout au long de la vie de l'animal. D'autres mouvements de migration de neurones vers différentes régions du cortex ont par la suite été mis évidence chez les rongeurs. Puis, en 2011, l'équipe d'Arturo Alvarez-Buylla a montré, pour la première fois chez des nouveau-nés humains, l'existence d'un flux de neurones identique à celui qui irrigue le bulbe olfactif des rongeurs (3). À la différence que chez les humains, ce flux de neurones est actif seulement pendant les six premiers mois après la naissance. Il s'affaiblit ensuite progressivement pour s'éteindre après l'âge de 2 ans. Les biologistes ont aussi remarqué que tous les neurones de ce canal ne finissent pas leur course dans le lobe olfactif. Certains bifurquent avant pour emprunter un autre chemin les conduisant dans le cortex préfrontal ventro-médian, une petite région

▲ *Trois étapes successives de la migration d'un neurone dans le cortex, observée « en direct » par vidéo microscopique.*

M.F. PAREDES ET AL.-SCIENCE / DR

Repères

- Des biologistes ont pu visualiser la migration d'une population particulière de neurones à l'intérieur des cerveaux de nouveau-nés pendant les premiers mois de la vie.
- Ces déplacements participent à la plasticité cérébrale, l'ensemble des modifications du réseau neuronal qui permet l'apprentissage et la mémorisation.
- L'étude de cette migration pourra aussi aider à mieux comprendre le développement des troubles neurologiques.



▲ *La migration des neurones après la naissance participe à la reconfiguration des circuits cérébraux chez le jeune enfant.*

CULTURA/IMAGE SOURCE / BSIP

située au-dessus des yeux. Pour approfondir cette découverte et rechercher d'autres destinations potentielles pour ces neurones migrateurs, l'équipe d'Arturo Alvarez-Buylla a recueilli 58 lobes frontaux prélevés chez des nourrissons morts entre 0 et 7 mois après la naissance. Une première étude au microscope des échantillons a révélé la présence d'une région qui présentait une forte densité en cellules, dessinant un arc à l'avant des ventricules latéraux. L'observation par IRM a également permis de visualiser en trois dimensions cette zone en forme d'arc. La morphologie de la majorité des cellules de cette zone était allongée, semblable à celle qui caractérise les jeunes neurones lorsqu'ils migrent au cours du développement fœtal. Autre indice suggérant que ces cellules étaient des neurones en cours de migration: elles produisaient des molécules spécifiques – notamment une protéine appelée doublecortine – habituellement émises par les neurones en migration. La comparaison des échantillons obtenus à différents âges a quant à elle montré que ces neurones se concentraient à proximité de la zone sous-ventriculaire juste après la naissance, puis se retrouvaient largement dispersés dans l'ensemble du cortex frontal jusqu'à l'âge d'environ 5 mois.

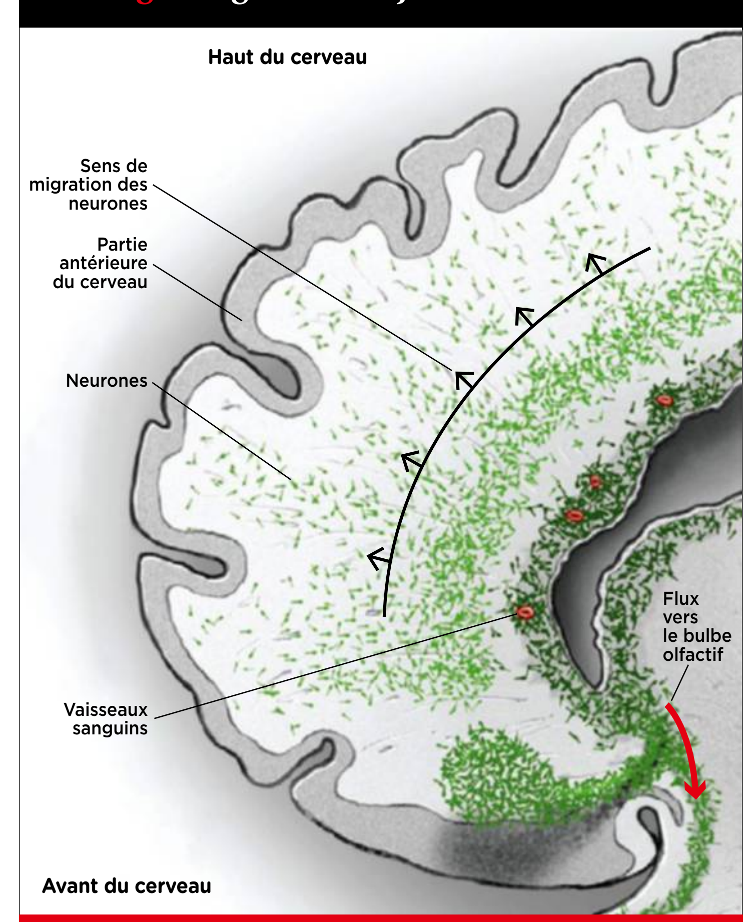
Mais, afin de s'assurer que ces neurones étaient effectivement en mouvement après la naissance, encore fallait-il pouvoir les observer ! Les biologistes ont alors infecté des échantillons de cortex, obtenus quelques heures seulement après le décès des nouveau-nés, avec un virus couplé à une protéine fluorescente. Ainsi marqués, les neurones en migration ont pu être suivis sous microscope, en direct. L'équipe a par exemple observé l'un d'eux migrer sur une distance d'environ 100 micromètres en quinze heures. *« C'est en* •••

••• *particulier le suivi de leur trajet grâce à la vidéo microscopique qui fait la force de ces résultats,* relève Marie-Catherine Tiveron, de l'Institut de biologie du développement de Marseille. *Car on est vraiment certains qu'ils migrent !* » **(Fig. 1)**

L'IMPACT SUR L'APPRENTISSAGE

Restait alors à identifier ces neurones. Tous exprimaient l'acide gamma-aminobutyrique (Gaba), le principal messager chimique inhibiteur du cerveau, ainsi qu'un récepteur habituellement retrouvé à la surface d'une population particulière de neurones, les interneurones, en migration. Preuves, selon l'équipe, que ces jeunes neurones sont des interneurones. Cette catégorie de cellules représente 20 % des neurones du cerveau. Elles ne forment pas de connexions via leurs longs axones avec des neurones situés à distance dans le cortex cérébral. Les interneurones établissent uniquement des connexions locales, en s'insérant entre des neurones situés les uns à côté des autres. Leur rôle est de moduler l'activité des neurones, parfois en faisant taire des populations entières de neurones excités. Comme ces interneurones ne se divisaient plus, les biologistes en ont déduit qu'ils s'étaient formés avant la naissance, lors du développement fœtal, par la division de cellules souches neuronales. Ils seraient ensuite retenus au sein de la zone sous-ventriculaire, formant une réserve de jeunes neurones prêts à migrer à la naissance.
« *Compte tenu de la nature de cette zone du cerveau assez spécifique au genre humain et impliquée dans les comportements sociaux, cette découverte ouvre de vastes perspectives de recherche,* souligne Marie-Catherine Tiveron. *Il faudra comprendre le rôle de ces nouveaux interneurones dans la plasticité cérébrale en lien avec les capacités d'apprentissage.* » Pour Frédéric Clotman, de l'Institut de neuroscience de l'université catholique de Louvain, en Belgique, « *on perçoit facilement l'énorme avantage qui consiste à intégrer des cellules dans les circuits corticaux au cours des phases précoces d'apprentissage et d'établissement des premiers contacts sociaux. Car il est possible qu'elles s'insèrent préférentiellement au niveau des neurones excités et participent ainsi à la plasticité des circuits corticaux grâce à leur action inhibitrice. Ce qui les rend vraisemblablement plus aptes à adapter leur organisation et leur activité aux stimuli rencontrés par les nouveau-nés et aux tâches qu'ils effectuent* ». Une analyse partagée par Olivier Houdé, directeur du laboratoire de psychologie du développement et de l'éducation de l'enfant, à l'université Paris-Descartes, qui a d'ailleurs montré l'importance des neurones inhibiteurs, tels les interneurones, pour l'apprentissage chez l'enfant **(4)** :

Fig.1 Migration de jeunes neurones



▲ *Sur cette coupe du cerveau antérieur d'un nouveau-né, les jeunes neurones sont représentés schématiquement. Alors qu'on avait déjà mis en évidence des flux de neurones chez le nouveau-né, notamment vers le bulbe olfactif, cette nouvelle étude montre que de grandes quantités de jeunes neurones migrent après la naissance dans toute la partie antérieure du cerveau.*

KENNETH PROBST

« *On savait déjà que vers l'âge de un an, le bébé apprend à inhiber des automatismes moteurs dans la tâche de recherche d'objets disparus, par exemple. Il apprend ainsi à rechercher un objet ailleurs que là où il l'a trouvé la première fois, alors qu'il a tendance à le rechercher au même endroit avant l'âge de un an. Ici, c'est la mise en place précoce de cette aptitude dans le cortex préfrontal qui est démontrée. Cela reste à découvrir, mais cette étude suggère en effet l'existence d'un mécanisme de plasticité neuronale qui serait propice à l'entraînement, à la maison comme à l'école, des fonctions exécutives contrôlées par le cortex préfrontal.* »
Cette découverte ouvre également des pistes pour comprendre l'émergence de pathologies neurologiques. Un manque d'oxygénation à la naissance pourrait en effet perturber la migration de ces interneurones. Car, pour se déplacer, ces cellules s'appuient sur

les vaisseaux sanguins qui, en plus de jouer le rôle de support mécanique, leur apportent de l'oxygène et des facteurs de croissance. *« Les interneurones pourraient alors ne pas réussir à migrer ou à trouver leur place au sein du réseau de neurones,* explique Tania Vitalis, de l'unité Protect de l'Inserm à Paris. *Or on sait qu'un déséquilibre entre l'inhibition et l'excitation des neurones est à l'origine de l'épilepsie. Une mauvaise migration des interneurones durant les premiers mois de vie pourrait induire une altération de la formation du "réseau cortical", ce qui favoriserait également l'émergence de troubles neurologiques comme la schizophrénie et les troubles du spectre autistique. »*

QUESTIONS SUR LES INTERNEURONES

Les interneurones, en modulant l'activité de neurones excitateurs voisins qui se projettent dans des régions éloignées du cerveau, aident en effet à moduler la communication entre ces régions. Communication qui se trouve perturbée chez les personnes souffrant de ces pathologies. *« Avec cette étude, on dispose à présent d'un véritable substrat anatomique qui pourrait expliquer le développement de ces maladies neurologiques,* estime Christine Métin, du laboratoire développement normal et pathologique du cerveau de l'Inserm. *« Toutefois, chez les souris, plus de 40 % des neurones générés après la naissance meurent pendant les 15 premiers jours de la vie postnatale,* remarque Tania Vitalis. *Il sera donc intéressant de mesurer la proportion d'interneurones effectivement intégrés et stabilisés au sein des circuits neuronaux, sachant que leur survie dépend notamment de l'activité cérébrale. »*

Quoi qu'il en soit, cette étude pose de nombreuses questions : *« Les stocks d'interneurones mis en évidence persistent-ils tout au long de la vie pour contribuer à la plasticité des circuits dont dépend l'efficacité de notre système nerveux ?* s'interroge Frédéric Clotman. *Existe-il d'autres stocks d'interneurones ou d'autres types de neurones, pour lesquels nous n'aurions pas encore de marqueurs permettant de les identifier, qui migreraient également après la naissance ? Ces cellules nerveuses pourraient-elles être mobilisées dans des processus de réparation de circuits endommagés ? »* Les études qui suivront ces résultats sont en tout cas très attendues. Pour Tania Vitalis, *« elles révéleront sans doute que cette migration s'étend à d'autres régions du cerveau ».* ■

(1) F. Paredes *et al., Science, 354,* 6308, 2016.
(2) C. Lois *et al., Science, 271,* 5251, 1996.
(3) N. Sanai *et al., Nature 478,* 382, 2011.
(4) O. Houdé *et al., Journal of Experimental Child Psychology, 110,* 332, 2011.

Et chez l'adulte ?

De nouveaux neurones naissent et migrent également à l'âge adulte. Mais ce phénomène reste limité à de petites régions du cerveau. C'est le cas du bulbe olfactif chez les rongeurs, qui est irrigué tout au long de la vie de l'animal en nouveaux neurones issus de la division de cellules souches neurales logées dans la zone sous-ventriculaire. Cet apport continu au sein du bulbe olfactif favorise la discrimination des odeurs. Chez l'humain, des neurones migrent également vers le bulbe olfactif après la naissance, mais cette migration est quasiment inexistante après l'âge de 2 ans. En revanche, une production continue de neurones à l'âge adulte a lieu dans l'hippocampe, une structure enfouie dans le lobe temporal de chaque hémisphère impliquée dans le processus de mémorisation (1). L'équipe de Jonas Frisén, de l'Institut Karolinska à Stockholm, a estimé qu'en un an, environ 700 nouveaux neurones sont intégrés à chaque hippocampe (droite et gauche), bien que cette proportion diminue avec l'âge (2). Si un défaut de cette production en nouveaux neurones pourrait jouer un rôle dans certaines maladies comme Alzheimer et Parkinson, la fonction de ces nouveaux neurones est encore difficile à établir. Jonas Frisén et son équipe ont également mis en évidence un apport de nouveaux neurones à l'âge adulte dans une seconde région, le striatum, située au-dessus de l'hippocampe et impliquée dans le contrôle de la motricité ainsi que de certaines fonctions cognitives (3). Mais la fonction de ces neurones, probablement issus de la zone sous-ventriculaire, est elle aussi inconnue. Les biologistes ont cependant noté la présence d'une plus faible quantité de nouveaux neurones intégrés au sein du striatum chez des sujets atteints de la maladie de Huntington. Celle-ci pourrait être due à un apport plus faible ou à la destruction préférentielle de ces nouveaux neurones, la maladie de Huntington se caractérisant en effet par une perte de neurones au sein de cette région. Un phénomène responsable de la difficulté à exécuter des mouvements volontaires, et des troubles de la mémoire et de l'attention rencontrés par les malades. Par ailleurs, une production accrue de neurones a été remarquée dans la zone sous-ventriculaire d'individus ayant été victime d'un AVC. Mais il est encore impossible de dire si cette neurogénèse participe à un éventuel processus de réparation des zones lésées. ■

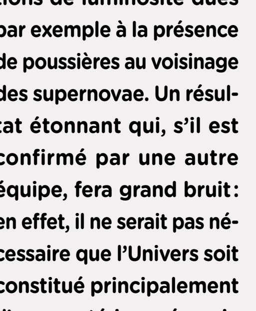
(1) P. S. Eriksson *et al., Nat. Med., 4,* 1313, 1998.
(2) K. L. Spalding *et al., Cell, 153,* 1219, 2013.
(3) A. Ernst *et al., Cell, 156,* 1072, 2014.

COSMOLOGIE

L'ACCÉLÉRATION DE L'EXPANSION DE L'UNIVERS REMISE EN QUESTION

L'Univers est en expansion de plus en plus rapide. Cette accélération de l'expansion cosmique a valu à ses découvreurs le prix Nobel de physique en 2011. Pourtant, trois astrophysiciens remettent en question ce pilier de la cosmologie moderne. Pour eux, l'analyse statistique des supernovae, explosions d'étoiles sur lesquelles se fonde cette observation, est compatible avec un taux d'expansion constant. Cette nouvelle analyse statistique utilise une base de données qui comprend des informations sur 740 supernovae de type Ia. Considérés comme des « chandelles standard » – leur luminosité intrinsèque est supposée connue –, ces astres sont autant de point de repères qui jalonnent l'Univers. La différence avec les analyses de leurs prédécesseurs? Les trois astrophysiciens ont pris en compte une procédure empirique pour corriger les variations de luminosité dues par exemple à la présence de poussières au voisinage des supernovae. Un résultat étonnant qui, s'il est confirmé par une autre équipe, fera grand bruit: en effet, il ne serait pas nécessaire que l'Univers soit constitué principalement d'une mystérieuse énergie répulsive de nature inconnue – l'énergie noire – pour expliquer l'accélération de l'expansion.

J.T. Nielsen *et al., Sci. Rep.*, doi : 10.1038/srep35596, 2016.



▲ *Les supernovae, telle SN 1994D (point en bas) ont servi de base à la nouvelle observation.*

BIOLOGIE

NÉS DE LA PEAU

Des Japonais sont parvenus à faire naître une dizaine de souriceaux à partir de cellules de peau. En manipulant une cellule de peau, les biologistes sont en effet capables de produire des cellules pluripotentes induites (iPS), qui, comme les cellules souches embryonnaires, peuvent se différencier en n'importe quelle cellule de l'organisme. Depuis cette découverte, les biologistes tentent de produire des spermatozoïdes ou des ovocytes à partir des iPS.
En 2012, une équipe japonaise avait réussi à différencier des iPS en ovocytes et à les féconder pour donner naissance à des souriceaux. Mais ces ovocytes avaient réalisé leur maturation complète dans des ovaires. Cette fois, l'équipe de Katsuhiko Hayashi, à l'université de Kyushu, au Japon, a obtenu entièrement in vitro des ovocytes issus d'iPS. Pour réaliser cette prouesse biotechnologique, elle a mis les cellules iPS en culture avec des cellules fœtales et un mélange de substances chimiques qui recrée un milieu proche de celui des ovaires. Fécondés ensuite in vitro, ces ovocytes ont engendré les souriceaux.

O. Hikabe *et al., Nature*, doi:10.1038/nature20104, 2016.

PHYSIQUE

À LA SOURCE DES NUAGES

Les nuages constituent la plus grande source d'incertitude dans les modèles climatiques. Les climatologues savent que les aérosols (particules en suspension dans l'atmosphère) jouent un rôle crucial dans leur formation. Grâce à une simulation réalisée à l'accélérateur de particules du Cern, à Genève, les principales sources d'aérosols ont pu être identifiées. Résultat : les rayons cosmiques et les radiations du Soleil produisent très peu d'aérosols, tandis que l'ammoniac atmosphérique et les composés organiques produits par l'homme en sont la principale source.

E.I. Dunne *et al., Science*, doi: 10.1126/science.aaf2649, 2016.

ÉCOLOGIE

MIGRATION MOINS MYSTÉRIEUSE

Une fois dans leur vie, les anguilles européennes entreprennent un périple qui les mène des rivières continentales à la mer des Sargasses, en Atlantique nord, pour s'y reproduire. Or ce long voyage reste mal connu.
La reconstitution partielle de la route migratoire de 80 individus équipés de balises a permis de mettre en évidence des stratégies de reproduction différentes. Les départs s'échelonnent entre août et décembre. Mais tandis que les plus rapides (47 km/jour) peuvent se reproduire dès leur arrivée – le pic de la reproduction a lieu au mois de février –, les plus lents (3 km/jour) n'atteignent leur destination que pour la saison de reproduction suivante.

D. Righton *et al., Sci. Adv.*, doi: 10.1126/sciadv.1501694, 2016.



▲ *Anguille européenne.*

> **NOUS N'AVONS PAS D'ÉTAT D'ÂME À RESTER MOBILISÉS SUR L'ÉDITION DU GÉNOME »**
>
> **PHILIPPE MAUGUIN,** nouveau PDG de l'Inra, le 14 octobre 2016, à propos de «nouveaux OGM» modifiés avec les ciseaux moléculaires CrispR-Cas9.

CHIMIE

Chercheurs avec nez

L'odeur typique de la résine d'oliban, utilisée comme encens, provient de deux molécules baptisées acides olibaniques. L'identification de ces composants présents en quantité infime a nécessité le recours à des nez, des chercheurs formés à reconnaître l'odeur de l'encens.

C. Cerutti-Delasalle *et al.*, *Angew. Chem. Int. Ed.*, *55*, 13719, 2016.

2 000

MILLIARDS DE GALAXIES DANS L'UNIVERS, c'est le résultat de la dernière estimation, dix fois supérieure à ce qu'on imaginait auparavant.

Ch. J. Conselice *et al.*, *ApJ*, *380*, 2016.

Vers des noyaux exotiques



▲ **L'accélérateur Spiral2 a été inauguré le 3 novembre au Ganil, près de Caen. Il produira des faisceaux très intenses d'ions légers et d'ions lourds. Projetés sur des cibles de matière, ces faisceaux, guidés par les aimants que l'on voit ici, engendreront des neutrons ou des noyaux plus lourds que l'uranium. L'objectif? Sonder les limites d'existence des noyaux normaux ou exotiques, découvrir de nouveaux éléments et tester de nouvelles voies de production de radioéléments à usage médical.**

PHILIPPE STROPPA/CEA/CNRS

NEUROPSYCHOLOGIE

DOULEUR CONTAGIEUSE

Des biologistes américains ont injecté à une souris une substance provoquant une hypersensibilité douloureuse avant de l'installer près d'une souris saine. Alors qu'elle n'a pas été exposée au traitement, celle-ci devient aussi hypersensible. Une troisième souris, située dans une autre enceinte et mise en présence de la litière des premières souris, développe les mêmes symptômes. La douleur serait donc transmise par un signal olfactif!

M. L. Smith *et al.*, *Sci. Adv.*, *2*, e1600855, 2016.

> **« C'est devenu mon quotidien de faire face à des pannes en simulateur et de me préparer pour la station spatiale »**
>
> **Thomas Pesquet,** avant son départ le 17 novembre pour la Station spatiale internationale.

BIOLOGIE

TIGES DEBOUT

Malgré les assauts du vent, les plantes retrouvent toujours leur position verticale. Le secret de cette prouesse vient d'être révélé: dans les statocytes, cellules réparties le long des tiges et constituant le système d'orientation des plantes, des grains d'amidon sédimentent sous l'action de la gravité. Leur mouvement, perçu par un capteur mécano-biologique, permet aux cellules de connaître leur position par rapport à la verticale.

H. Chauvet *et al.*, *Sci. Rep.*, doi: 10.1038/srep35431, 2016.

L'imagerie fantôme s'ouvre aux rayons X

Une technique d'imagerie reposant sur des faisceaux lumineux de faible intensité est désormais exploitable avec les rayons X. Des applications médicales sont à la clé.

Certaines méthodes d'imagerie sont dites « fantômes ». Un nom intrigant lié à leur fonctionnement. Pour produire l'image d'un objet, elles font appel à un faisceau lumineux que l'on divise en deux. Une partie, de faible intensité, touche l'objet avant d'être enregistrée par un détecteur; l'autre partie, plus intense, est enregistrée par un autre détecteur, sans avoir touché l'objet (elle sert de référence). Les données collectées par les deux détecteurs sont ensuite corrélées: en repérant les correspondances (les endroits où les faisceaux ont frappé leur détecteur respectif au même moment), il est possible de reconstruire l'image de l'objet illuminé en silhouette (d'où le nom de « fantôme »).

L'avantage majeur de cette technique? Le faisceau qui touche l'objet étant de faible intensité, elle émet bien moins de radiations nocives qu'une technique classique d'imagerie. Deux groupes de physiciens – l'un en Australie et en Europe, l'autre en Chine – viennent, indépendamment l'un de l'autre, de réaliser une première: ils ont démontré que l'on peut obtenir des images à l'aide de cette technique en utilisant des rayons X (longueurs d'onde comprises entre 0,001 et 10 nanomètres environ) (1). Cette avancée ouvre des perspectives dans le domaine médical, où l'on a souvent recours aux rayons X et où la quantité de radiations reçues par les patients est un enjeu crucial. Déjà utilisée avec de la lumière visible ou infrarouge, l'imagerie fantôme n'était pas exploitée avec des rayons X, ces derniers n'étant pas assez lumineux. Dans son dispositif, l'équipe australo-européenne a pu résoudre ce problème à l'aide d'un écran fluorescent (un scintillateur) et d'un intensificateur de lumière (Fig. 1).

DEUX MÉTHODES

Les physiciens ont orienté leur faisceau de rayons X (produit au synchrotron de Grenoble) vers un « diviseur » (un ruban de silicium). Celui-ci fait diffracter légèrement une partie des rayons vers l'objet à imager; il laisse passer l'autre partie sans la perturber. Puis les deux faisceaux traversent l'écran fluorescent et l'intensificateur de lumière, avant d'être enregistrés par une caméra ultrarapide. La corrélation de ces deux enregistrements a permis aux physiciens de générer une image en silhouette de l'objet (un câble en cuivre).

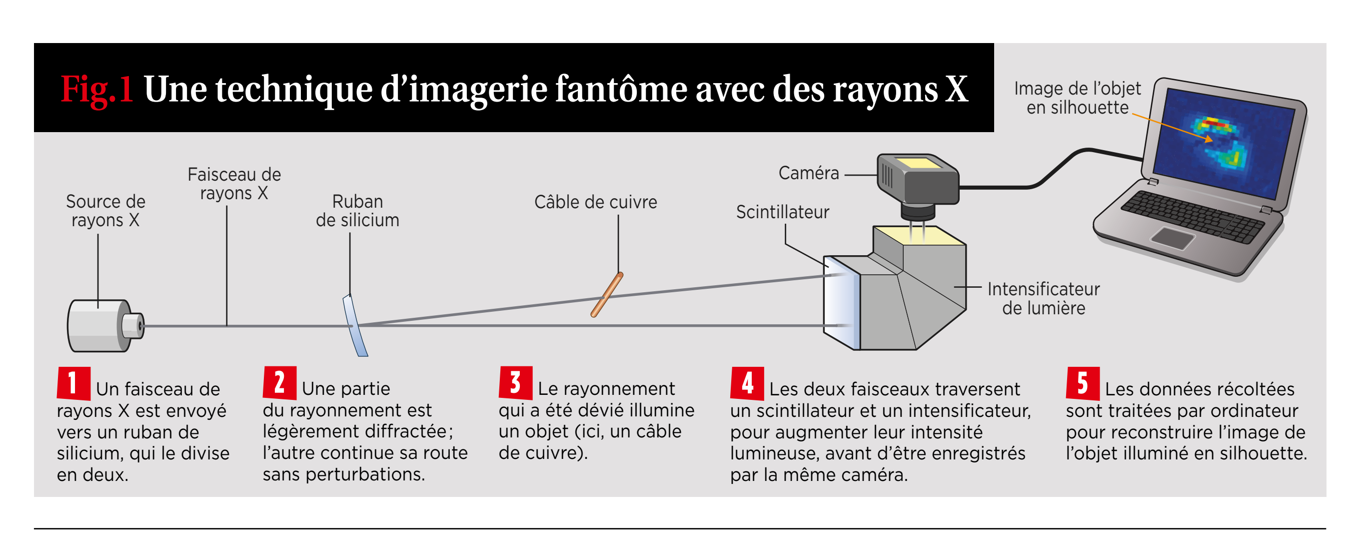
Le système mis en place par l'équipe chinoise diffère: l'objet (un film d'or à cinq fentes) a été placé par intermittence devant les rayons X produits par le synchrotron de Shanghai (il n'y a donc pas eu de division du faisceau); les données ont été enregistrées par une caméra dite « à transfert de charge » puis traitées à l'aide d'outils mathématiques, afin de produire l'image en silhouette de l'objet.

Ivan Vartaniants, du laboratoire Desy, à Hambourg, note que ces expériences utilisent des rayonnements produits par des synchrotrons, bien différents des sources de rayons X conventionnelles en imagerie médicale. Néanmoins, le physicien juge ces travaux *« stimulants et d'excellente qualité »*.

Vincent Glavieux

(1) D. Pelliccia *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, *117*, 113902, 2016 ; H. Yu *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, *117*, 113901, 2016.

Fig.1 Une technique d'imagerie fantôme avec des rayons X



INFOGRAPHIE : BRUNO BOURGEOIS

Des insectes envahissants et très coûteux

À la frontière de l'économie, de l'écologie et de l'épidémiologie, une étude chiffre les dégâts économiques causés par les invasions d'insectes que favorise le réchauffement climatique.

Le chiffre est impressionnant : 77 milliards de dollars (70 milliards d'euros) par an, c'est le coût annuel des dégâts provoqués par les insectes envahissants ! Ce montant, largement sous-estimé, a été obtenu par l'équipe internationale menée par Franck Courchamp, du laboratoire écologie, systématique et évolution, à l'université Paris-Sud (1). Les conséquences de la présence de tels insectes dans une région sont désastreuses : propagation de maladies infectieuses, dévastation de cultures, fragilisation des écosystèmes forestiers, destruction des infrastructures. Les invasions d'insectes ne peuvent donc qu'affecter l'économie mondiale. Pour en chiffrer le coût global, les chercheurs ont compilé les données issues de 737 articles, livres et rapports parus entre 1911 et 2015. L'étude distingue l'impact sur les biens et services (agriculture, infrastructures, économie forestière) et celui qui touche la santé (limité à sept affections, dont la dengue, le chikungunya et les infections dues aux virus West Nile et Zika). Pour les premiers, le coût est évalué à un minimum de 70 milliards de dollars par an ; pour les seconds, il s'élève à 6,8 milliards de dollars par an.

DES CHIFFRES SOUS-ESTIMÉS

Les auteurs considèrent que ces chiffres ne peuvent être qu'une estimation a minima. En effet, les données couvrent inégalement les différentes régions du monde. Selon Franck Courchamp, ce biais d'échantillonnage est une source importante de sous-estimation : *« Nous avons pu calculer que si statistiquement les autres continents faisaient autant d'études que l'Amérique du Nord, le coût minimal passerait de 77 à 270 milliards de dollars par an. »* En outre, les résultats prennent en compte seulement les insectes les plus ravageurs, et ne considèrent pas les services écosystémiques – telle la pollinisation – délicats à évaluer.



La fourmi de feu (Solenopsis invicta) *fait partie des espèces envahissantes les plus menaçantes.*

ALEX WILD/UNIVERSITY OF TEXAS

Le développement des échanges commerciaux internationaux risque d'aggraver cette situation. Le réchauffement climatique – qui permet la colonisation de régions de plus en plus septentrionales – devrait également jouer un rôle important. Ainsi, les surfaces touchées par l'invasion des insectes venant du sud pourraient croître de 18 % d'ici à 2050.

Peut-on enrayer ce phénomène inquiétant ? *« Plus on sera à même d'estimer ce qui se passe réellement, plus on sera en mesure de lutter contre ce problème »*, remarque Franck Courchamp. Mais on ne pourra pas faire l'économie d'une politique de biosécurité. *« Ces mesures sont plus efficaces quand elles sont internationales, mais elles peuvent aussi être prises unilatéralement, comme l'ont fait depuis des années l'Australie et la Nouvelle-Zélande pour limiter les espèces envahissantes, en mettant en place un système de quarantaine de protection aux frontières »*, conclut le chercheur.

Laurence Denis

(1) C. J. A. Bradshaw *et al.*, *Nat. Commun.*, 7, 12986, 2016.

Nouvelle stratégie végétale

En imitant l'odeur d'un bon repas, la plante *Ceropegia sandersonii* parvient à capturer la mouche *Desmometopa.* Relâchée plusieurs heures plus tard, chargée de pollen, celle-ci devient ainsi pollinisatrice malgré elle.

Quand il s'agit d'assurer la survie d'une espèce, la nature fait souvent montre d'une grande ingéniosité. La preuve avec *Ceropegia sandersonii,* plante endémique d'Afrique du Sud et du Mozambique, dont la pollinisation est assurée par une petite mouche, *Desmometopa.* Consommant pourtant exclusivement des insectes, cette dernière est particulièrement attirée par *C. sandersonii.*

Stefan Dötterl, de l'université de Salzbourg, en Autriche, et son équipe ont en effet découvert que cette plante émettait une combinaison de composés chimiques semblable à celle émise par la proie de la mouche : une abeille mellifère en détresse, c'est-à-dire prise au piège pour servir de repas à un autre insecte ou à une araignée (1). Or la mouche *Desmometopa* se nourrit de ces abeilles capturées par un autre prédateur. Elle doit d'ailleurs se diriger très rapidement vers sa proie avant que celle-ci ne soit entièrement dévorée. C'est également ce qui se passe avec *C. sandersonii.* La mouche, trompée par le leurre olfactif, se précipite vers la fleur. « *Ne voyant pas l'abeille, elle pénètre dans le tube ventru qui compose une partie de la fleur. Une fois à l'intérieur, elle ne peut plus faire marche arrière, car le dispositif anatomique de la plante, des cils situés à l'entrée du tube, l'en empêche* », explique Stefan Dötterl.

LEURRE OLFACTIF

La mouche est prise au piège par la plante pendant environ vingt-quatre heures puis est relâchée, chargée du pollen (dont elle s'est recouverte en se débattant), et affamée ! Cela la rend d'autant plus susceptible d'être à nouveau prise au piège par une autre fleur de *C. sandersonii,* qu'elle ira polliniser avec le pollen de la dernière fleur qu'elle a visitée. « *On connaissait déjà l'existence de leurres olfactifs chez certaines orchidées : elles émettent des odeurs de femelles d'insectes pollinisateurs, qui attirent les mâles. Ces derniers s'accouplent avec la fleur et transmettent ainsi le pollen. Mais des fleurs imitant l'odeur d'insectes morts, c'est tout à fait original* », indique Isabelle Dajoz, de l'Institut d'écologie et des sciences de l'environnement de Paris.

Comment un stratagème aussi complexe a-t-il pu être élaboré ? Selon Stefan Dötterl, les molécules qui entrent en jeu sont des composés qui, pris séparément, se retrouvent fréquemment émis chez un certain nombre de plantes et d'animaux. « *À un moment donné, il y a eu une mutation chez un individu de l'espèce* Ceropegia sandersonii, *qui s'est mis, par hasard, à émettre ce cocktail de composés. Il a attiré plus de pollinisateurs que ses congénères ne disposant pas de cette mutation, son pollen a donc été largement utilisé pour donner naissance à de nouvelles plantes porteuses de cette mutation.* » L'avantage comparatif dû à la mutation est donc devenu la norme.

Bérénice Robert

(1) A. Heiduk *et al, Current Biology, 26,* 1, 2016.



▶ *La plante parachute* (Ceropegia sandersonii) *imite l'odeur d'une abeille en détresse, dont la mouche* Desmometopa *se nourrit. Résultat : elle piège la mouche et sera ainsi pollinisée.*

STEFAN DÖTTERL - GERNOT KUNZ

«Les grands singes savent ce que les autres savent… comme les humains»

Une équipe de primatologues a montré que des grands singes peuvent deviner comment un individu va se comporter en fonction d'une croyance qu'ils savent erronée.

La Recherche Les expériences d'une équipe internationale (1) laissent penser que les chimpanzés, les bonobos et les orangs-outans sont capables d'attribuer une «fausse croyance» aux autres. De quelle capacité s'agit-il?

Frans de Waal On a pris l'habitude de l'appeler «théorie de l'esprit». Un terme abusif, car ni les singes ni les hommes ne savent «lire dans les esprits». Ce qui est «lu», c'est le corps de l'autre. Je préfère parler de «prise de perspective». De nombreux travaux ont été menés afin de déterminer si les grands singes sont dotés de cette capacité. Mais un point critique nous échappait encore: savent-ils ce que les autres savent même s'ils savent que c'est faux? Chez l'humain, cette compétence est testée à l'aide de l'épreuve de la «fausse croyance»: deux enfants voient un adulte mettre une balle dans un panier. Le premier enfant sort. L'adulte prend la balle et la met dans une boîte. On demande à l'enfant resté dans la pièce dans quel contenant l'autre enfant ira chercher la balle quand il rentrera. À partir de 4 ans environ, il répond «dans le panier», preuve que sa réponse est indépendante de son point de vue. Toute la difficulté était de faire passer ce test à des êtres incapables de parler.

> «NI LES SINGES NI LES HOMMES NE SAVENT "LIRE DANS LES ESPRITS". ILS "LISENT" LE CORPS DE L'AUTRE»

Qu'est-ce qui a permis à cette équipe de réussir là où d'autres ont échoué?

Elle a fait appel à un dispositif qui détecte la direction du regard de grands singes visionnant des vidéos. Dans l'une d'elles, un acteur déguisé en King Kong vole un objet à un autre acteur, et le cache dans une boîte, en sa présence. Mais après l'avoir chassé, King Kong reprend l'objet dans cette boîte, située à gauche, le replace dans une autre, à droite, puis le reprend et part avec. L'autre acteur revient, où va-t-il chercher l'objet? Le regard des grands singes se porte surtout sur la boîte de gauche. Ils présagent que l'acteur agira en fonction de ce qu'il a vu, et donc d'une «fausse croyance». Les chercheurs ont également utilisé un scénario dans lequel un acteur se dissimule dans deux cachettes successives. Ce test a été passé par 40 grands singes (contre 30 pour le premier): 19 chimpanzés, 14 bonobos et 7 orangs-outans. Il n'a pas montré de différence significative entre espèces.

Qu'est-ce que ces résultats changent?

Des primatologues ont eu l'intuition, très tôt, que cette capacité de prise de perspective n'était pas réservée à l'homme. Ainsi, dès la fin des années 1960, Emil Menzel se promenait en compagnie d'un chimpanzé, et sous ses yeux cachait de la nourriture. Puis il relâchait d'autres chimpanzés, qui avaient vu la scène de loin. Menzel notait qu'ils observaient attentivement celui qui en savait plus qu'eux. En 1978, David Premack et Guy Woodruff publient: *Does the chimpanzee have a theory of mind?* (2). Depuis, les psychologues ont fait de la «théorie de l'esprit» un Graal, la compétence centrale qui distinguerait l'homme des autres animaux. Les expériences infructueuses sur les «fausses croyances» semblaient leur donner raison. Cette publication creuse une brèche dans le mur que certains imaginent entre les humains et les autres animaux.

Propos recueillis par Pierre Vandeginste

(1) C. Krupenye *et al.*, *Science, 354*, 110, 2016.
(2) D. Premack et G. Woodruff, *Behav Brain Sci, 1*, 515, 1978.



▲ *Frans de Waal, éthologue.*

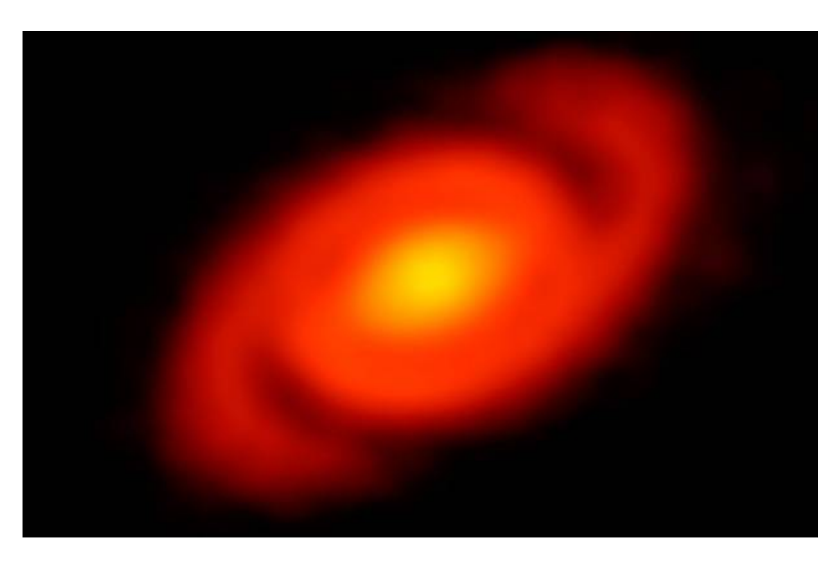
SES DATES

1977 Doctorat à l'université d'Utrecht (Pays-Bas).
1981 Chercheur au Wisconsin Regional Primate Research Center.
1991 Chercheur au Yerkes National Primate Research Center d'Atlanta, où il dirige le Living Links Center, et professeur à l'université Emory.
2016 Parution de *Sommes-nous trop «bêtes» pour comprendre l'intelligence des animaux?* (Les Liens qui Libèrent).

DR

Des bras spiraux autour d'une jeune étoile

Des astronomes ont identifié des structures en forme de spirale à l'intérieur d'un disque de gaz et de poussières entourant une étoile. Une première.



▲ *Ces bras spiraux, détectés pour la première fois autour d'une étoile, pourraient donner un nouvel éclairage sur la formation des planètes.*

On pensait jusqu'ici que les bras spiraux étaient l'apanage des galaxies. Voici qu'une équipe internationale a mis en évidence, pour la première fois, de telles structures dans le disque de gaz et de poussières entourant une étoile (1). La découverte pourrait permettre de mieux comprendre comment les planètes se forment au sein de ces disques. C'est en scrutant la jeune étoile Elias 2-27, âgée d'un million d'années et située à 450 années-lumière de la Terre, que Laura Pérez, de l'Institut Max-Planck de radioastronomie, en Allemagne, et ses collègues ont détecté ces bras. Les données ont été prises par le radiotélescope Alma, au Chili, dans une longueur d'onde millimétrique, donc sensible aux grains de poussières. Elles ont permis d'identifier deux bras en forme de spirale s'étendant très loin de l'astre.

Comment ces bras sont-ils apparus ? Première hypothèse : compte tenu de la masse importante du disque de gaz et de poussières qui entoure l'étoile (un quart de la masse de l'étoile), celui-ci aurait tendance à se fragmenter en régions plus denses. Ces zones de surdensité auraient ensuite perturbé la matière en mouvement dans le disque, y créant des ondes, comme un rocher au milieu d'une rivière engendre des vagues à la surface de l'eau. Le disque étant en rotation, ces perturbations auraient formé ces structures en spirale.

UN CONCENTRÉ DE MATIÈRE

La présence de bras spiraux n'est pas anodine : ils pourraient jouer un rôle dans la formation des planètes. Aujourd'hui, une majorité d'astronomes pensent que les planètes naissent à partir des poussières présentes dans les disques. En se collant les unes aux autres, celles-ci engendreraient des objets rocheux de plus en plus gros. Mais ce modèle a ses limites : arrivés à une taille d'un mètre environ, ces objets sont tellement freinés par le gaz environnant qu'ils devraient tomber sur l'étoile en moins de mille ans. À moins que certains mécanismes permettent aux embryons de planètes de croître plus rapidement jusqu'à atteindre une taille suffisante pour contrecarrer leur chute. L'un de ces mécanismes pourrait être les bras spiraux. Car *« la matière y est plus concentrée, ce qui favorise la formation des planètes »*, explique Myriam Benisty, de l'Institut de planétologie et d'astrophysique de Grenoble.

Seconde hypothèse : ces bras pourraient avoir été créés par une planète déjà présente dans le disque qui serait capable, elle aussi, de perturber la matière. Scénario conforté par la présence, plus près de l'étoile, d'un anneau quasiment vide de poussières. C'est cette planète hypothétique qui, en repoussant la matière de part et d'autre de son orbite, aurait creusé un tel sillon. *« Sauf que le sillon semble trop mince pour avoir été créé par une planète aussi grosse que celle qui serait à l'origine des bras spiraux »*, note Myriam Benisty.

Alors, ces bras spiraux sont-ils la cause ou la conséquence de la formation planétaire ? De nouvelles observations pourraient bientôt permettre de résoudre cette énigme. **Julien Bourdet**

(1) L. Pérez *et al*, *Science*, *353*, 1519, 2016.

B. SAXTON (NRAO/AUI/NSF); ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

ENTREPRISES, COLLECTIVITÉS, FINANCEZ VOS BESOINS DE RECHERCHE,

DANS LES DOMAINES DES PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES, DES SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA VIE, DES SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES

Dans le cadre d'un partenariat entre un étudiant, son laboratoire d'accueil et vous, l'ADEME vous aide à produire des connaissances nouvelles et renforce les capacités humaines de votre R&D en finançant un doctorant pendant 3 ans !

ENSEMBLE POUR CONSTRUIRE UN MONDE PLUS DURABLE

www.ademe.fr/theses







CONCEPTION & RÉALISATION GRAPHIQUE : OLFA NEMSI

Les premières migrations racontées par l'ADN

Trois équipes ont séquencé le génome de 787 personnes issues de plus de 270 populations dans le monde. Leur analyse confirme que nos ancêtres ont migré massivement hors d'Afrique il y a 100 000 à 70 000 ans.

C'est la somme d'un travail colossal d'enquête sur nos origines. Un groupe de recherche de la Harvard Medical School, conduit par David Reich et Nick Patterson, a mené le Simons Genome Diversity Project : le séquençage du génome de 300 individus issus de 142 populations à travers le monde (1). De leur côté, sous la supervision de Eske Willerslev, de l'université de Copenhague, d'autres chercheurs ont recueilli et analysé le génome de 25 Papous de Nouvelle-Guinée et de 83 Aborigènes d'Australie, réalisant la première grande étude de la diversité génétique du continent océanien (2). Même effort pour l'équipe de Mait Metspalu, du Biocentre estonien, à Tartu, en Estonie, qui a ajouté 379 génomes à la base de données (3).

À partir de ce pactole, les généticiens ont remonté le temps par traitement statistique. Car, chaque fois qu'un groupe humain a été géographiquement ou culturellement séparé d'un autre, il a accumulé un certain nombre de mutations propres. Autant de traces archivées dans l'ADN des humains actuels. À partir de ces dernières, les chercheurs ont établi des datations, se fondant sur une « horloge biologique », la vitesse présumée à laquelle les mutations s'accumulent au fil du temps. Les travaux des équipes de David Reich et Eske Willerslev ont alors abouti à la même conclusion : l'immense majorité du patrimoine génétique propre à tous les non-Africains contemporains provient d'une vague de migration qui a quitté l'Afrique il y a 100 000 à 70 000 ans et a établi ses descendants dans le monde entier. Leurs résultats confirment un schéma largement admis aujourd'hui : tous les humains actuels descendent d'une seule espèce qui est apparue en Afrique, puis s'est répandue sur les autres continents. C'est la théorie « Out of Africa ».

UNE PRÉCISION INÉGALÉE

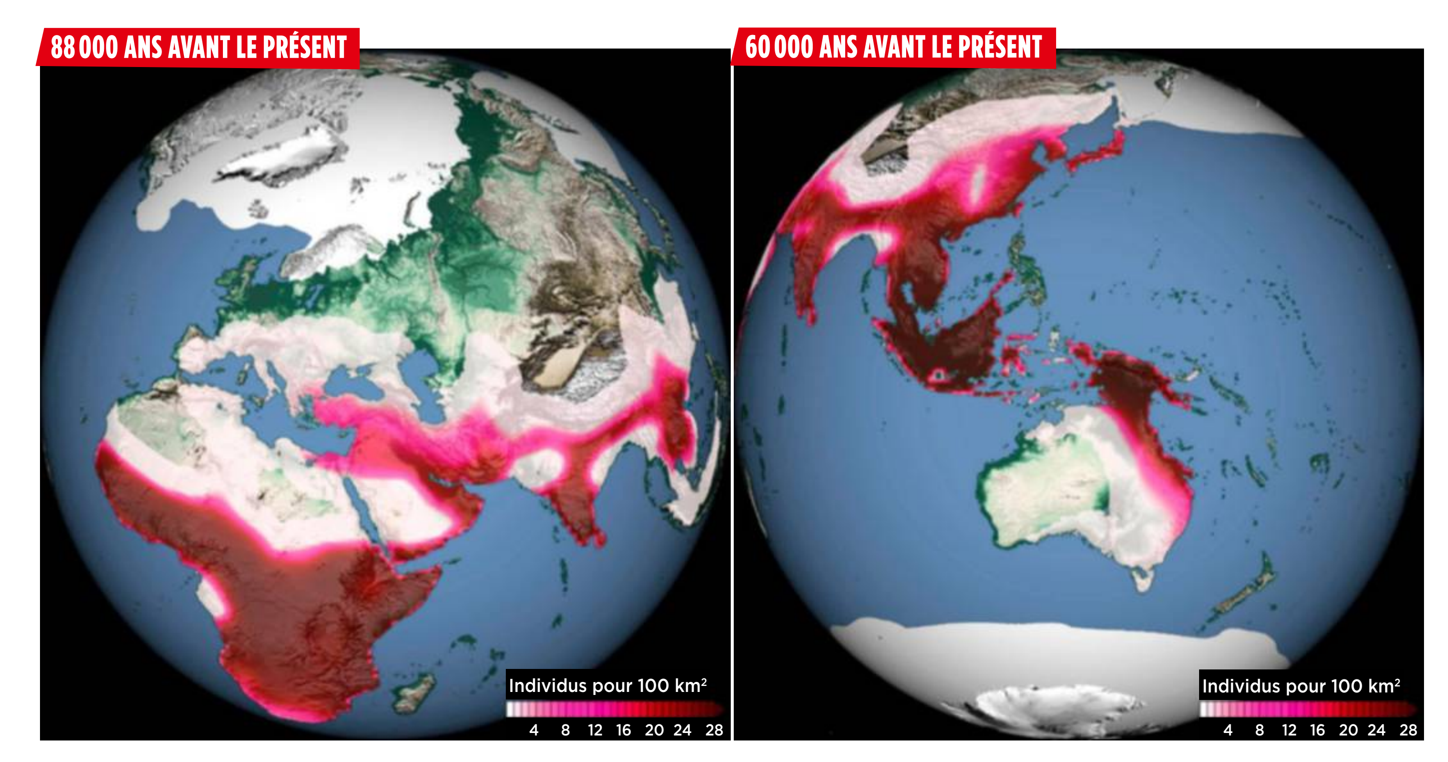
Mais combien faut-il compter de vagues d'émigration africaine ? Sur ce point, les équipes divergent. Les équipes de David Reich et Eske Willerslev n'en ont décelé qu'une seule (même s'ils n'excluent pas qu'il en existe d'autres). Pour Mait Metspalu et ses collaborateurs, en revanche, on en compterait au moins deux : environ 2 % des génomes recueillis en Asie australe chez les Papous et les Aborigènes d'Australie portent la trace d'une vague encore plus ancienne de peuplement de cette région, qu'ils datent à environ 120 000 ans.

Certes, ces études valident surtout ce que nous savions déjà. Pourtant, elles marquent une étape historique pour la discipline. D'une part, elles se sont intéressées à des populations plus petites que dans les précédents projets, ce qui permet de mieux représenter la diversité mondiale. D'autre part, *« la baisse des coûts du séquençage nous permet désormais de séquencer en masse des génomes complets, avec leurs 3 milliards de "lettres", de nucléotides, là où nous devions nous contenter de 200 000 il y a quelques années »*, explique Paul Verdu, anthropogénéticien au CNRS et au musée de l'Homme. Cela apporte une précision inégalée aux résultats. Ces études sont également remarquables par la diversité des échantillons accumulés. Les chercheurs ont bravé les difficultés pour aller récolter des génomes encore jamais étudiés, comme ceux de populations indigènes, un trésor riche en informations et un chantier à peine entamé au regard de la diversité humaine. *« Les populations africaines sont encore largement sous-représentées parmi les échantillons recueillis »*, regrette ainsi Paul Verdu.

QUATRE FENÊTRES CLIMATIQUES

Axel Timmermann et Tobias Friedrich, de l'Université de Hawaï, ont réalisé une modélisation des transformations climatiques survenues en Afrique au paléolithique moyen. À partir de paramètres tels que les évolutions de l'orbite terrestre (à l'origine de variations de l'ensoleillement), l'épaisseur de la calotte polaire ou l'élévation des océans, ils ont produit une simulation précise du climat et de la végétation au cours du temps. Leurs conclusions, publiées dans *Nature* (1) le même jour que les résultats des trois études génétiques, apportent un complément intéressant à ces dernières. Les deux chercheurs estiment à quatre, et non pas une, le nombre de « fenêtres climatiques » au cours desquelles le Sahara, le Sinaï et l'Arabie étaient assez humides et dotés en végétation pour permettre à nos ancêtres une sortie d'Afrique : de 106 000 à 94 000 ans, de 89 000 à 73 000 ans, de 59 000 à 47 000 ans, et enfin de 45 000 à 29 000 ans avant le présent. Alors, une ou plusieurs vagues « Out of Africa » ? La question demeure largement ouverte.

(1) A. Timmermann et T. Friedrich, *Nature*, doi:10.1038/nature19365, 2016.



Un modèle intégrant l'histoire du climat permet de déterminer les « fenêtres » au cours desquelles les migrations depuis l'Afrique ont été possibles.

AXEL TIMMERMANN ET AL./SCHOOL OF OCEAN AND EARTH SCIENCE AND TECHNOLOGY/UNIV. OF HAWAÏ, MANOA

Quand bien même, ce type d'étude massive ouvre de belles perspectives. Les chercheurs peuvent désormais tenter d'explorer des zones d'ombre jusqu'alors inaccessibles. Par exemple, on sait grâce aux vestiges fossiles que l'homme anatomiquement moderne a émergé il y a au moins 200 000 ans en Afrique, avant de commencer, il y a 100 000 à 70 000 ans, son aventure mondiale d'ampleur. Une question très discutée est celle du lieu et des circonstances de son apparition. Certains imaginent que cette humanité moderne, sur le plan biologique comme sur le plan comportemental, aurait pu émerger rapidement dans un territoire restreint. Ce petit groupe se serait ensuite lancé à la conquête du reste de l'Afrique, puis du monde. *« Personnellement, je ne crois pas du tout à ce jardin d'Éden,* déclare Jean-Jacques Hublin, professeur à l'Institut Max-Planck d'anthropologie évolutive, à Leipzig en Allemagne, et au Collège de France. *J'imagine plutôt une diversité de populations africaines tantôt séparées, tantôt échangeant des gènes, qui toutes ont pu contribuer très tôt à l'émergence de comportements modernes. »*

LA VAGUE MIGRATOIRE HORS D'AFRIQUE A EU LE PRINCIPAL IMPACT SUR LE PATRIMOINE GÉNÉTIQUE ACTUEL. CELA NE SIGNIFIE PAS QUE CE FUT LA SEULE.

À Boston, l'équipe de David Reich s'est justement penchée sur la question. Elle a décelé des traces de « substructures génétiques » déjà présentes il y a 200 000 ans. Ces organisations du génome pourraient être associées à l'émergence précoce de groupements culturels, avec des traditions, des langues et des comportements modernes. *« Il est intéressant que l'on commence à ouvrir cette boîte noire qu'est l'Afrique d'avant la colonisation moderne de l'Eurasie »*, souligne Jean-Jacques Hublin.

Quoique riches en informations, les résultats obtenus doivent à l'heure actuelle être lus avec précaution. Une marge d'erreur non négligeable est encore présente dans les datations établies à partir du génome. La vitesse présumée à laquelle les mutations s'accumulent au fil du temps, et sur laquelle les équipes se sont fondées, n'est qu'une moyenne. *« À l'avenir,* note Paul Verdu, *des échantillons plus importants réduiront cette incertitude. »*

La démarche souffre en outre d'une limite fondamentale. À l'aide d'ADN contemporain, on ne peut mesurer que le legs génétique transmis avec succès jusqu'à nous. *« Certains chercheurs considèrent que l'on peut reconstruire toute l'histoire de notre espèce à partir de génomes actuels, mais cela suppose qu'il existe aujourd'hui des descendants de toutes les populations passées,* explique Jean-Jacques Hublin. *Or, certaines populations ont pu disparaître sans laisser de traces ! »* Au fond, que peut-on conclure de ces études ? Que la vague migratoire hors d'Afrique la plus récente a eu le principal impact sur le patrimoine génétique actuel. Cela ne signifie pas pour autant que cette vague fut la seule. *« Voilà pourquoi il faut s'appuyer également sur de l'ADN trouvé sur des fossiles »*, souligne Jean-Jacques Hublin. Sans quoi les branches mortes de notre arbre génétique resteront à jamais dans l'ombre.

Thibault Panis

(1) S. Mallick *et al., Nature, 538,* 201, 2016.
(2) A.-S. Malaspinas *et al., Nature, 538,* 207, 2016.
(3) L. Pagani *et al., Nature, 538,* 238, 2016.



Plongeon sans risque

Redoutable chasseur sous-marin, le fou de Bassan pénètre dans l'eau à près de 80 km/h. Cela lui permet d'atteindre des poissons jusqu'à 15 mètres de profondeur. Comment parvient-il à ne pas se blesser? Pour le comprendre, une équipe de chercheurs américains a étudié la biomécanique de l'animal, reproduisant son plongeon avec des maquettes et filmant le tout à l'aide de caméras à haute vitesse (1). L'analyse du processus révèle que c'est la combinaison entre les forces hydrodynamiques – qui dépendent de la vitesse – et la contraction des muscles jugulaires qui autorise ce plongeon inouï et stable.

Philippe Pajot

(1) B. Chang *et al., PNAS, 113,* 12006, 2016.

SUNNY JUNG/VIRGINIA TECH

Un miroir avec quelques atomes

Quelques milliers d'atomes seulement peuvent former un miroir grâce à une fibre optique de diamètre nanométrique. Deux expériences décrivent par quel processus.

« *Ce n'est pas la première fois qu'on réalise un miroir avec des atomes piégés,* explique Julien Laurat, professeur à l'université Pierre-et-Marie-Curie. *Mais les dispositifs précédents comptaient quand même plusieurs millions d'atomes.* » Son équipe du laboratoire Kastler Brossel (LKB) à Paris vient de réaliser une sorte de miroir constitué de quelques milliers d'atomes et capable de réfléchir jusqu'à 75 % de la lumière qu'on lui envoie (1). Une équipe de l'université de Copenhague a publié les résultats d'une expérience similaire (2).

D'ordinaire, un atome ne réfléchit qu'une quantité infime de lumière. Afin d'obtenir un pouvoir réfléchissant important, il faut augmenter les interactions entre lumière et matière. À cette fin, l'élément central des deux expériences est une fibre optique, semblable à celles qui sont utilisées en télécommunications. Seulement, cette fibre a été étirée de sorte que son diamètre ne soit plus que de 400 nanomètres, soit deux fois inférieur à la longueur d'onde de la lumière utilisée. Celle-ci est ainsi concentrée le long de cette nanofibre sur une longueur d'un centimètre. « *Le diamètre de la nanofibre est si petit que la moitié de l'énergie lumineuse se propage à l'extérieur de la fibre,* précise Julien Laurat. *C'est ce que nous appelons le champ évanescent, qui permet à la lumière d'interagir avec les atomes situés à proximité.* »

LA DISTANCE ENTRE LES ATOMES EST RÉGLÉE À QUELQUES CENTIÈMES DE NANOMÈTRE PRÈS

Les atomes (ici, du césium) restent proches de la fibre car ils sont piégés par des faisceaux laser. Ces faisceaux, qui passent tous dans la nanofibre, forment une onde stationnaire, motif lumineux alternant zones d'intensité maximale et zones d'intensité minimale. Analogues à des « puits » où peuvent tomber les atomes, les zones d'intensité maximale piègent les atomes à intervalle régulier. Les atomes sont dits froids car ils sont à une température de l'ordre de 20 millionièmes de degré au-dessus du zéro absolu. Dans l'expérience du LKB, environ 2 000 atomes sont ainsi rassemblés de part et d'autre de la nanofibre, environ 1 300 dans celle de l'équipe danoise.

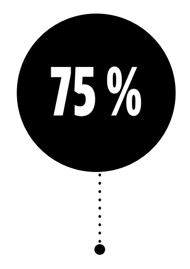
Un autre faisceau laser de test peut alors être envoyé afin de mesurer la quantité de lumière réfléchie par le système. Dans ces conditions, chaque atome se comporte comme un petit miroir et peut théoriquement réfléchir quelque 0,01 % de l'intensité lumineuse. « *Cela peut sembler faible, mais cumulé sur quelques milliers d'atomes, cela peut donner une réflexion quasi parfaite* », précise Julien Laurat. Toutefois, pour que l'effet soit cumulatif, il faut que la petite onde lumineuse réfléchie par un atome se superpose parfaitement avec les ondes réfléchies par les atomes voisins. Cette condition, dite de Bragg, est obtenue en réglant la distance entre les atomes : les pièges sont positionnés à quelques centièmes de nanomètre près, ce qui représente une prouesse. L'ensemble d'atomes réfléchit alors jusqu'à 75 % du faisceau test dans l'expérience française (10 % pour celle des Danois).

Ce type de miroir atomique pourrait être activé et désactivé par quelques photons. « *Par exemple, un premier photon envoyé sur ce miroir déciderait si le photon suivant serait réfléchi ou transmis* », imagine Julien Laurat. De telles interactions entre photons uniques via une fibre optique serviraient à réaliser des portes logiques quantiques, éléments de base de l'ordinateur quantique, mais elles pourraient aussi être utiles dans de futurs réseaux de communication quantique.

Sylvain Guilbaud

(1) N. V. Corzo *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, *117*, 133603, 2016.
(2) H. L. Sorensen *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, *117*, 133604, 2016.





DE LA LUMIÈRE A ÉTÉ RÉFLÉCHIE **par le miroir constitué de quelques milliers d'atomes réalisé par le laboratoire Kastler Brossel, à Paris.**

Les secrets dévoilés des gènes qui nous donnent cinq doigts… et pas un de plus

Une étude publiée dans *Nature* révèle les subtils mécanismes génétiques qui gouvernent la formation de cinq doigts chez la plupart des animaux à quatre membres. Un fin jeu de régulation entre deux gènes, *Hoxa11* et *Hoxa13,* apparaît déterminant.

D'où viennent les cinq doigts de la plupart des tétrapodes ? Dotée de deux paires de membres, cette super-classe de vertébrés comprend les mammifères, les amphibiens, les reptiles (dont certains ont perdu leurs pattes) et les oiseaux (dont les pattes avant se sont muées en ailes).

Quand les premiers tétrapodes sont apparus, il y a 380 à 375 millions d'années (Ma), ils vivaient dans l'eau. Mais très vite (10 Ma plus tard), ils se sont aventurés sur terre, grâce à une innovation morphologique majeure : l'apparition de leurs membres, par transformation des nageoires de leurs ancêtres poissons. Une famille de gènes a joué ici un rôle clé : les gènes *Hox.*

De la mouche aux vertébrés, ces gènes déterminent le plan d'organisation des animaux à symétrie bilatérale. C'est grâce à eux que notre tête, nos bras, notre thorax, notre abdomen, notre bassin… sont à leur bonne place. Leurs mutations ont des effets spectaculaires : elles créent, par exemple, des mouches qui possèdent des pattes à la place des antennes.

Les gènes *Hox* sont regroupés en complexes le long des chromosomes. *« Leur ordre le long des chromosomes est corrélé à l'ordre des segments qu'ils forment le long de l'axe antéro-postérieur,* relève François Karch, de l'université de Genève. *De plus, chez les vertébrés, ces gènes ont été recrutés pour différencier les différents segments des membres, comme l'épaule, le bras, l'avant-bras, la main et les doigts. »*



▲ *En reproduisant chez la souris l'activité du gène* Hoxa11 *suivant le modèle présent chez le poisson, on obtient une patte à sept doigts.*

Pour ajouter à la complexité, les gènes *Hox* ont subi deux duplications chez les vertébrés. Ils existent en effet en quatre versions : *Hoxa, Hoxb, Hoxc* et *Hoxd,* aux gènes numérotés de 1 à 13. Les gènes situés à l'une des extrémités de ces complexes, *Hox11* à *Hox13,* sont ceux qui interviennent le plus tardivement au cours du développement de l'embryon. Dans les membres, ils forment les parties distales, comme le poignet, la main et les doigts.

Publiée dans *Nature* par l'équipe de Marie Kmita, de l'Institut de recherches cliniques de Montréal **(1)**, une étude précise comment ces gènes modèlent les cinq doigts. L'équipe de Denis Duboule, à Genève, avait précédemment montré que *Hoxd13* agit en inhibant *Hoxd11,* exprimé plus tôt et plus haut dans le membre **(2)**. Cette inhibition apparaît indispensable à la formation de cinq doigts seulement – et pas plus. Car si l'on mute *Hoxd13,* on crée des souris à plus de cinq doigts, autrement dit atteintes de polydactylie.

MUTATIONS

Ici, l'équipe de Marie Kmita a réalisé un élégant jeu de mutations chez la souris. *« Pour que ce tétrapode ait cinq doigts, il faut absolument que les gènes* Hoxa11 *et* Hoxa13 *ne s'expriment pas dans les mêmes cellules, au sein des extrémités des pattes en développement »,* explique François Karch, qui n'a pas participé à l'étude. Si tel n'est pas le cas, le rongeur est polydactyle. *« Les études fossiles montrent que les premiers tétrapodes étaient dotés de six à huit doigts »,* souligne Marie Kmita. Pourquoi la plupart des tétrapodes actuels n'en ont-ils plus que cinq ? Cette étude dévoile une partie du mystère.

Florence Rosier

(1) Y. Kherdjemil *et al, Nature,* doi:10.1038/nature19813. 2016.

(2) L. Beccari *et al., Genes Dev., 30,* 1172, 2016.



Parlons maths en langage informatique!

La dernière chronique vous proposait de chercher l'erreur dans les programmes informatiques en utilisant la puissance des mathématiques. Vous avez peut-être cru que l'on dénigrait les informaticiens du haut du piédestal des mathématiques. L'heure est venue de casser ce stéréotype. Le lauréat du prix Turing 2013, Leslie Lamport, informaticien américain affirme que près d'un tiers des articles de recherche en mathématiques contiennent des erreurs. Pire, les manuels universitaires publiés et republiés ne sont pas exempts d'erreurs mathématiques (pas des coquilles mais de vraies erreurs) : plutôt embarrassant quand on sait que c'est dans ces ouvrages que les futurs mathématiciens se forment.

D'OÙ VIENNENT CES ERREURS ? De la rédaction! Si les mathématiques ont beaucoup évolué, les mathématiciens persistent à utiliser les langues naturelles (longtemps le français mais aujourd'hui majoritairement l'anglais) avec toutes leurs ambiguïtés. Les imprécisions sont identifiables par la plupart des mathématiciens mais requièrent quelquefois de gros efforts, surtout quand les démonstrations s'allongent : les travaux sur la classification des groupes finis dépassent les 10 000 pages d'articles publiés.

« LES MATHÉMATICIENS PERSISTENT À UTILISER LES LANGUES NATURELLES AVEC TOUTES LEURS AMBIGUÏTÉS »

POUR SIMPLIFIER LES VÉRIFICATIONS et s'assurer de la correction d'une démonstration, Leslie Lamport préconise une écriture plus formelle avec une disposition hiérarchisée et l'utilisation des capacités du format hypertexte (des liens permettant des renvois précis) inspirée des pratiques en informatique. Ainsi, on pourrait presque instantanément tester si les hypothèses du théorème utilisé pour une étape de déduction sont bien vérifiées. Pourquoi suivrait-on ces préconisations ? Tout d'abord parce que Leslie Lamport a acquis une grande expérience et respectabilité : outre ses travaux informatiques universellement reconnus, il a rendu un immense service à la communauté mathématique en créant le langage LaTeX. Ce langage sert aujourd'hui à composer tous les textes mathématiques et à avoir de belles mises en page malgré d'importantes quantités de formules. Les possibilités que ce langage offre aux auteurs dépassent bien souvent les rêves les plus fous et peu sont ceux qui songeraient raisonnablement à s'en passer aujourd'hui.

AUTRE RAISON DE FAIRE CONFIANCE à Leslie Lamport : son point de vue va dans le sens de l'histoire ! À l'apparition de l'algèbre, les mathématiciens utilisent des mots pour l'ensemble de leurs travaux, y compris les formules. Vers le XVIIe siècle, on bascule progressivement vers de nouvelles habitudes d'écriture : les formules deviennent les suites de caractères standardisées que nous connaissons encore aujourd'hui.

ESSAYEZ PAR EXEMPLE de comprendre puis de résoudre (toujours avec des phrases) le problème énoncé par le mathématicien jésuite Christophorus Clavius (1) en 1583 : « *On cherche trois nombres tels que le premier, ajouté à 73, fasse le double des deux autres ; le second, avec 73, fasse le triple des deux autres, le troisième enfin, avec 73, fasse le quadruple des deux autres.* » (*) Cet exemple, pas vraiment compliqué, vous sensibilise à la précision gagnée en utilisant des notations adaptées pour les formules. Leslie Lamport propose désormais d'étendre ce désir de précision aux phrases qui soutiennent le raisonnement et qui sont placées entre les formules : pour entrer dans les mathématiques du XXIe siècle, commençons par quitter les habitudes du XVIIe ! ■

(1) Traduction du latin de Maryvonne Spiesser dans *Histoire d'algorithmes,* Belin, 1994, p. 124.

(*) Retrouvez la solution sur notre site : www.larecherche.fr

Roger Mansuy, professeur au lycée Louis-le-Grand, à Paris, nous raconte, chaque mois, un thème mathématique inspiré par un exposé grand public.



Retrouvez l'exposé de Leslie Lamport au séminaire Mathematic Park www.tinyurl.com/Lamport-demonstration

DR

dossier

EMBRYON

Cinq questions sur les premières heures de la vie

Robert Edwards, le père de la fécondation in vitro, est l'un des premiers, au début des années 1970, à observer au microscope les premiers jours de l'embryon humain. En 2016, toujours à Cambridge en Angleterre, l'équipe de Magdalena Zernicka-Goetz réussit à cultiver in vitro des embryons humains au-delà du septième jour. Que sait-on de l'organisation de leur génome, de l'activation des premiers gènes, des mécanismes de division? Les biologistes ont beaucoup avancé sur ces questions et nous apportent leurs fascinantes réponses.

▸ *Cette première cellule de l'embryon humain a été obtenue par fécondation in vitro. Au centre de l'image, les pronoyaux mâle et femelle se rapprochent pour fusionner.*

CMSP RAWLINS/BSIP



1

Quels sont les premiers gènes à s'exprimer ?

Après la fécondation, l'ADN de l'embryon met bien plus de temps qu'on ne le croit à s'activer.

Mathias Germain, journaliste

Repères

- **Lors de la fécondation, les ADN maternel et paternel ne se regroupent pas immédiatement.**
- **Leur expression débute huit heures après la fécondation, puis d'une façon plus intense après la première division de l'embryon en cellules.**
- **Une centaine de gènes s'expriment dans les premières cellules, les blastomères.**

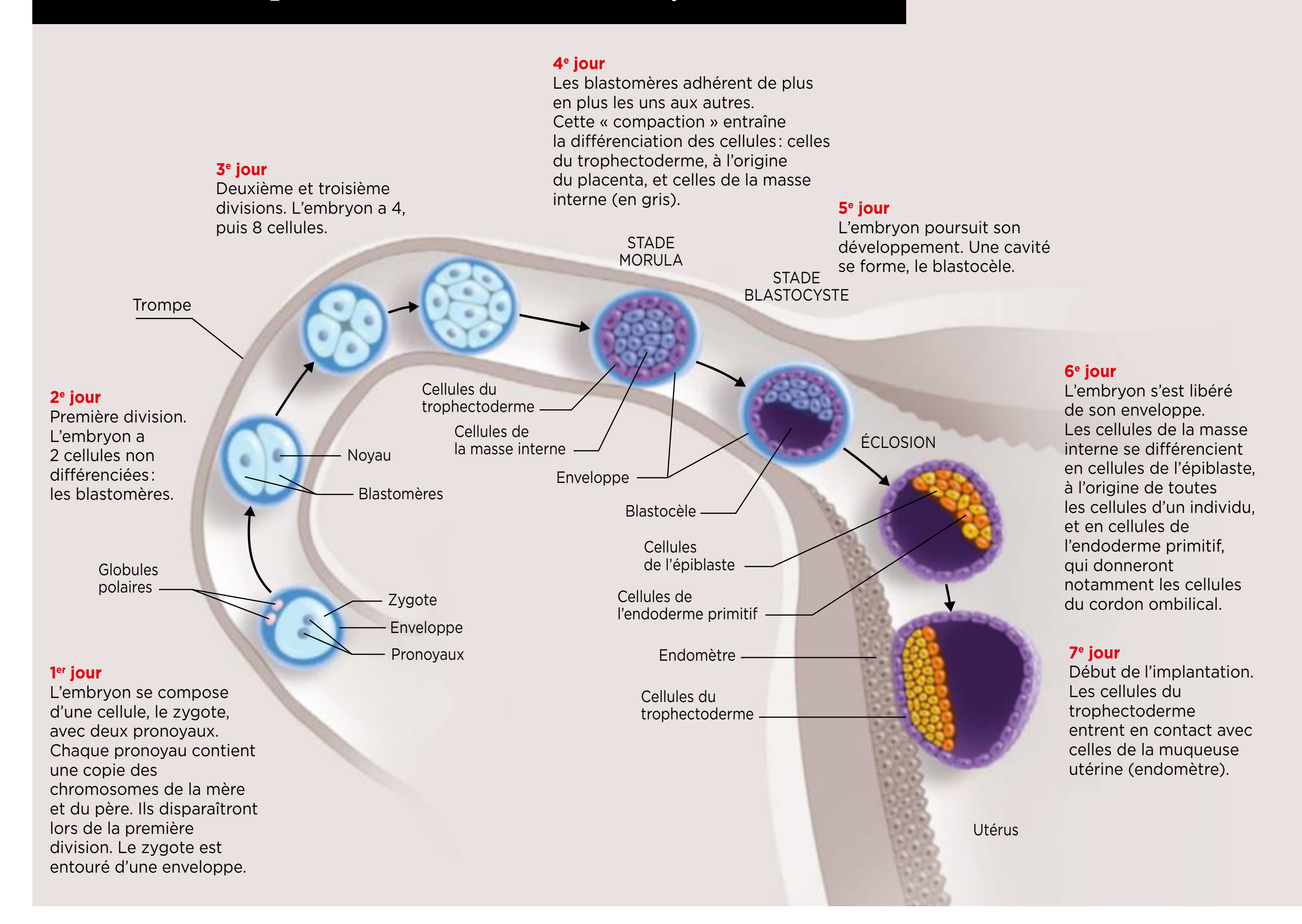


u départ, nous ne sommes qu'une seule cellule, mais neuf mois plus tard nous sommes constitués d'innombrables cellules qui font des choses complètement différentes, comme les cellules de la peau, du foie, de l'œil… Le matériel génétique de ces cellules pourtant est exactement le même », souligne Maria Elena Torres-Padilla, biologiste à l'Institut d'épigénétique et des cellules souches du Helmholtz Zentrum de Munich et à l'Institut de génétique et de biologie moléculaire et cellulaire de Strasbourg. Que se passe-t-il au niveau de l'ADN embryonnaire pour parvenir à une telle diversité de fonctions et à une telle organisation ? C'est ce que tentent de savoir les biologistes, grâce aux techniques de plus en plus fines de séquençage et d'analyse de l'ADN mais également des premières molécules transcrites de l'ADN, les ARN messagers (ARNm).

On imagine que, dès les premières minutes de la fécondation, démarre une intense activité génétique. Et pourtant, lorsqu'un ovule vient d'être fécondé par un spermatozoïde, sur le plan génétique, il ne se passe rien ! Du moins pendant les premières heures… En effet, le génome de l'embryon n'est pas vraiment constitué : les ADN maternel et paternel sont encore séparés, chacun dans un compartiment membranaire, le pronoyau. La première cellule de l'embryon, le zygote, contient donc deux pronoyaux. À l'intérieur, les ADN sont inactifs. Ils ne sont pas transcrits en ARNm ni traduits en protéines. Pour comprendre pourquoi, il faut se situer avant la fécondation, au moment de la formation des gamètes. *« Lors de la formation de l'ovule et du spermatozoïde, ces ADN sont rangés, compactés pour être inactifs,* explique Michel Cohen-Tannoudji, biologiste à l'Institut Pasteur, qui mène des travaux sur l'embryogénèse chez la souris. *Par exemple, dans le spermatozoïde, dont le noyau est environ deux fois plus petit que celui de l'ovule (10 micromètres environ), les séquences ADN sont extrêmement compactées. Pourquoi ? À la fois pour prendre le moins de place possible, et pour ne pas être altérées lors de la migration du spermatozoïde. »*

MODIFICATION DES HISTONES

Pour cela, les séquences ADN ne sont pas associées à des histones – les protéines utilisées habituellement par les cellules pour embobiner le génome dans le noyau – pour former la chromatine. Les histones ont été remplacées au cours de la formation du spermatozoïde (spermatogénèse) par d'autres protéines, plus petites, les protamines. Dans l'embryon, cette organisation de l'ADN doit donc être modifiée pour que la machinerie moléculaire qui sert à la synthèse



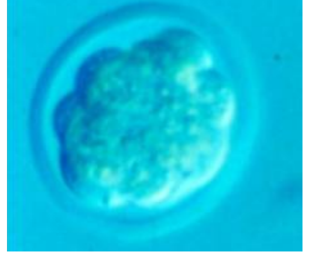
INFOGRAPHIE : SYLVIE DESSERT

des premières protéines puisse y accéder. Une réorganisation de l'ADN maternel est également nécessaire, même s'il a été moins compacté dans le noyau de l'ovule. Les premières heures du zygote sont donc consacrées à ce processus.
Dès lors, comment fonctionne le zygote, en attendant d'accéder à toutes les informations génétiques qui pilotent son développement ? *« Tout le matériel nécessaire à sa survie se trouve déjà dans le cytoplasme* (*) *qui provient de l'ovocyte,* rappelle Michel Cohen-Tannoudji. *Il a accumulé au cours de sa genèse les réserves nutritionnelles, protéiques et tous les éléments de base au bon fonctionnement cellulaire, afin que l'embryon puisse réaliser en toute autonomie les premières divisions. »* C'est pour cette raison que l'ovule ressemble à une grosse cellule disproportionnée. Il contient notamment les histones autour desquels se réorganise l'ADN paternel.
Plusieurs études sur une variété d'histones présentes dans le zygote, appelées H3, ont été publiées récemment. *« Dans l'ensemble, les études démontrent un processus de remodelage drastique de la chromatine au moment de la formation des ovocytes et des spermatozoïdes, puis aux premiers stades du développement embryonnaire,* précise Maria Elena Torres-Padilla. *Mais le plus intéressant est que certaines modifications d'histones réalisées pendant l'ovogénèse passent dans l'embryon et peuvent donc jouer un rôle essentiel dans la mise en activation du génome nouvellement formé. »*
Par exemple, des équipes chinoises, d'une part, et danoises, norvégiennes et américaines, d'autre part, se sont intéressées à une modification de l'histone H3 dans des ovocytes et des embryons de souris. L'histone H3 est un complexe protéique qui contient différent acides aminés, telle la lysine. Cette lysine peut connaître des modifications chimiques, comme la fixation de trois groupes méthyles (CH_3). Dans les cellules matures de l'organisme, cette histone avec •••

(*) **Le cytoplasme** est la solution visqueuse riche en protéines et en nutriments qui emplit la cellule et dans laquelle baigne le noyau.

••• une lysine méthylée, appelée H3K4me3, est observée à proximité de séquences ADN où débute la transcription des gènes. Leur présence est donc associée à l'expression des gènes. En étudiant la présence des H3K4me3 dans la chromatine des ovocytes, ces différentes équipes de biologistes ont constaté que ces histones se trouvaient à proximité de gènes qui sont exprimés au cours de la croissance de l'ovocyte. En outre, ils ont repéré la présence d'histones H3K4me3, avec une plus faible concentration mais sur de plus longues séquences de la chaîne ADN, là où il n'y avait pas d'activité génétique. Ce qui est intriguant, c'est que ces histones ont été retrouvées aux mêmes emplacements le long de la chaîne ADN non plus de l'ovocyte mais de l'embryon. Et, dans ce cas, les gènes situés à leur proximité étaient activés, notamment chez l'embryon au stade deux cellules (1, 2). Ces travaux restent à confirmer, mais ils laissent penser que des marques, comme ces histones H3K4me3 mis en place dans l'ovocyte, servent à l'activation du programme génétique de l'embryon. *« Ces travaux suggèrent que cette méthylation, qui est héritée par l'embryon en développement, semble lui fournir une mémoire épigénétique de l'état transcriptionnel de l'ovocyte »*, explique Maria Elena Torres-Padilla.

DEUX TYPES DE CELLULES SE FORMENT



Vers le troisième jour après la fécondation, alors que l'embryon se compose de huit cellules, commence la première différenciation entre les cellules. Celles-ci ne cessent de se multiplier, mais dans un espace contraint, car l'embryon est enveloppé d'une structure protectrice et de la membrane de l'ovocyte. Elles adhèrent donc de plus en plus les unes aux autres par des jonctions moléculaires. Elles se polarisent : elles ont un pôle en contact avec la membrane de l'ovocyte et un autre avec l'intérieur de l'embryon. Cette polarisation oriente les divisions cellulaires, provoque des différences. Deux types de cellules apparaissent alors : des cellules plus petites, situées en périphérie extérieure, en contact direct avec la membrane de l'ovocyte, et d'autres un peu plus grosses à l'intérieur de l'embryon. Les premières forment le trophectoderme, un tissu qui entrera en contact avec la muqueuse utérine pour l'implantation, et sera à l'origine du placenta. Les secondes forment la masse interne qui formera plus tard de nouveaux tissus.

De petites séquences génétiques d'habitude réprimées sont activées aux stades où l'embryon a quatre puis huit cellules

La réorganisation des ADN paternel et maternel autour des histones ouvre la porte à une première activité génétique. *« Nous avons découvert chez la souris, mais cela se confirme aussi chez l'homme, qu'il y a une première vague d'activation du génome de l'embryon qui survient entre huit et dix heures après fécondation,* note Maria Elena Torres-Padilla. *C'est une toute première vague, petite en termes d'intensité. Puis il y a une seconde vague beaucoup plus importante, qui se produit vers la fin du stade deux cellules. »* Le décodage des premiers gènes de l'embryon débute donc progressivement. Il s'agit essentiellement de gènes codant des protéines qui servent justement à ce décodage, autrement dit à la transcription de l'ADN.

QUESTIONS SUR LE MÉLANGE DES ADN

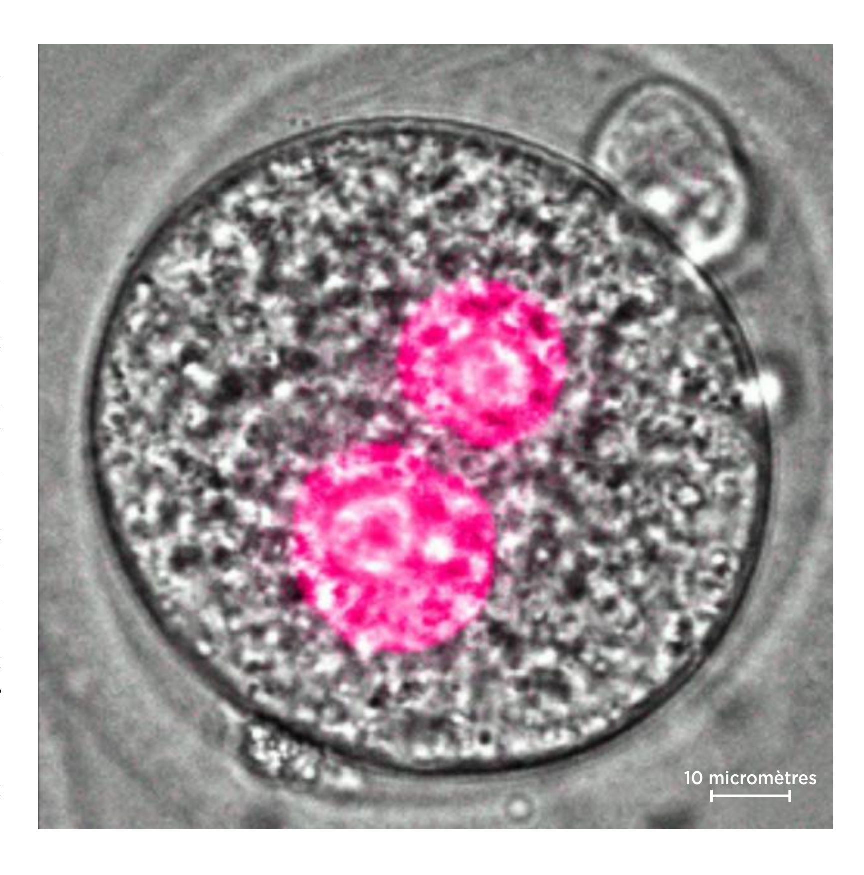
Cette première vague de transcription intrigue les biologistes. En effet, les séquences génétiques transcrites ne correspondent pas toutes à des gènes codant des protéines. On trouve aussi de nombreuses séquences, courtes et répétitives, normalement inactives dans les cellules de notre organisme, qui sont transcrites lors de cette première activation du génome de l'embryon. L'équipe de Maria Elena Torres-Padilla a ainsi démontré qu'une variété de ces séquences courtes et répétitives, les rétrotransposons Line-1, était activée quelques heures après la fécondation (3). *« La réorganisation de l'ADN rend sans doute ses séquences plus accessibles aux facteurs de transcription,* indique la biologiste. *Nous avons également montré que cette activation des rétrotransposons était initiée par une nouvelle classe de très petits ARN de seulement 17 nucléotides, plus petits encore que les microARN ou ARN interférents déjà connus, qui comptent une vingtaine de nucléotides. »*
Un travail chez l'homme confirme l'activation de petites séquences génétiques habituellement réprimées, aux stades où l'embryon a quatre

MICHEL COHEN-TANNOUDJI - CHARLES BABINET

puis huit cellules. En 2015, une équipe de l'Institut Karolinska, à Stockholm, a analysé les ARN issus de la transcription de l'ADN lors des premières divisions cellulaires de l'embryon. Dans cette étude, plus de 300 cellules ont été séquencées : des ovocytes, des zygotes et les cellules issues des premières divisions, appelées blastomères. Cette équipe a ainsi identifié 32 gènes activés dans les cellules du deuxième jour, et 129 dans celles du troisième jour. Les chercheurs ont également constaté que les séquences promotrices de ces gènes – les zones de l'ADN où se fixe l'enzyme qui permet la transcription de l'ADN en ARN – se chevauchent avec des séquences génétiques mobiles, appelées séquences Alu (4). Ces résultats suggèrent que ces séquences sont impliquées dans le démarrage du programme génétique de l'embryon. Les rétrotransposons Line-1 ou ces séquences Alu serviraient de promoteurs pour les premiers gènes qui sont exprimés tôt. *« Ils ont peut-être un deuxième rôle : faire en sorte de promouvoir une configuration ouverte de la chromatine, pour que l'activation du génome soit plus facile »,* poursuit Maria Elena Torres-Padilla, qui conduit des travaux pour le démontrer.

Dernier point encore plus intrigant, certaines de ces séquences génétiques mobiles activées sont d'anciennes traces de virus qui ont infecté le génome au fil de l'évolution. Ainsi la biologiste américaine Renee Reijo Pera, qui a dirigé le centre de recherche sur les cellules souches de l'université Stanford, a découvert en 2015 dans des cellules embryonnaires du sixième jour, juste avant l'implantation, qu'une séquence ADN provenant d'un rétrovirus (*) était transcrite en ARN puis traduite en protéine (5). *« Ce rétrovirus, appelé HERV-K, aurait infecté l'ancêtre commun des hommes et des chimpanzés, il y a 200 000 ans,* indique Renee Reijo Pera. *Le plus intéressant est que cette protéine d'origine virale semble stimuler les mécanismes immunitaires des cellules embryonnaires. »*

De nombreuses questions restent encore en suspens pour comprendre l'activité génétique qui se produit au moment du développement embryonnaire. À quel moment les ADN du père et de la mère se mélangent-ils ? Lors de la fécondation, les deux ADN sont enfermés dans deux pronoyaux. Au microscope, ceux-ci restent complètement indépendants l'un de l'autre, séparés physiquement pendant le tout premier cycle cellulaire. *« Les deux pronoyaux subissent des processus épigénétiques qui sont très différents par rapport aux marques des histones, et par rapport à l'organisation globale dans le noyau,* explique Michel Cohen-Tannoudji. *Les deux ADN se retrouvent dans un même noyau, au stade de deux cellules, chez les blastomères. Mais, encore à ce stade, ils sont séparés. C'est fascinant : au microscope, on voit l'ADN maternel qui occupe une moitié du noyau et l'ADN paternel l'autre. On suppose que le mélange arrive deux divisions plus tard, au stade huit cellules. »* Les deux ADN sont-ils activés avec la même intensité ? Les premières données le suggèrent. C'est une surprise pour Maria Elena Torres-Padilla, car *« pendant longtemps, on a estimé que la chromatine maternelle est la plus active car elle est moins compacte au départ que la chromatine paternelle ».* ■



▲ ***Chromatine (en rose) des pronoyaux maternel (au-dessus) et paternel, à l'intérieur du zygote.***

LABO VERLHAC

(1) J. A. Dahl *et al., Nature 537,* 548, 2016.

(2) B. Zhang *et al., Nature, 537,* 553, 2016.

(3) A. Fadloun *et al., Nature Structural & Molecular Biology, 20,* 332, 2013.

(4) V. Töhönen *et al., Nature Communications,* doi : 10.1038/ncomms9207, 2015.

(5) E. J. Grow *et al., Nature,* doi : 10.1038/nature14308, 2015.

(*) **Un rétrovirus** est un virus dont le code génétique s'intègre dans le génome des cellules infectées.

2

Pourquoi l'embryon hérite-t-il des mitochondries de sa mère ?

Vingt minutes après la fécondation, l'élimination des mitochondries paternelles commence dans l'embryon. Un mécanisme étudié chez l'animal et chez l'homme.

Mathias Germain, journaliste

Repères

- **Seules les mitochondries portées par l'ovule sont conservées dans l'embryon.**
- **Une expérience chez l'animal montre que la coexistence de mitochondries paternelles et maternelles est délétère.**
- **Pour éviter cette coexistence, divers mécanismes biologiques sont à l'œuvre, tels que l'autophagie, sorte d'autodestruction à l'échelle cellulaire.**

(*) **Le centrosome** est la structure qui organise les filaments utiles à la division cellulaire.

Lors de la fécondation, tout n'est pas mis en commun entre l'ovule et le spermatozoïde. Du côté du spermatozoïde, le noyau qui contient l'ADN, et ce qu'on appelle le centrosome (*), sont transmis. Mais aucun des petits organes internes n'est conservé. Ce tri s'exerce notamment sur les « usines » qui procurent l'énergie à la cellule, les mitochondries. Seules les mitochondries de l'ovule sont conservées dans l'embryon.

Or ces organes essentiels à la vie des cellules ont la particularité de contenir, eux aussi, de l'ADN. De courtes séquences ! L'ADN mitochondrial (ADNmt) contient 37 gènes, alors que l'ADN du noyau en contient environ 23 000. Ce tri des mitochondries implique donc qu'un embryon hérite seulement de l'ADNmt maternel. Cet héritage n'est pas propre à l'espèce humaine. Et il soulève beaucoup d'interrogations : quelles sont les raisons de cette élimination ? Après tout, un spermatozoïde humain ne contient que quelques dizaines de copies d'ADNmt contre plusieurs centaines de milliers chez l'ovule. Est-ce délétère pour le développement si cet ADNmt persiste dans l'embryon ? Comment est-il repéré et éliminé, ainsi que les mitochondries ?

L'équipe de Ding Xue, à l'université du Colorado aux États-Unis, a récemment apporté des éléments de réponse. Sur de petits vers très utilisés en laboratoire, appelés *Caenorhabditis elegans*, ces biologistes ont montré que, au moment de la fécondation, une molécule spécialisée dans la dégradation de l'ADN mitochondrial, l'endonucléase G, est activée dans le spermatozoïde (1). La concentration d'ADN mitochondrial spermatique décroît alors très rapidement dans l'embryon, preuve que cet ADN est éliminé. « *Leurs travaux confirment ce qui avait été démontré précédemment chez la drosophile et chez le poisson,* explique Vincent Galy, de l'université Pierre-et-Marie-Curie, à Paris. *La nouveauté, c'est que l'équipe de Ding Xue a dans un second temps inhibé l'expression de l'endonucléase chez des* C. elegans *mâles. Autrement dit, ces mutants produisaient des spermatozoïdes incapables de déclencher la dégradation de leur ADNmt. L'équipe a donc pu observer les conséquences d'un maintien anormal de cet ADNmt dans l'embryon : 2 à 6 fois plus d'embryons mouraient, et les divisions cellulaires qui assurent leur développement étaient significativement ralenties.* » La coexistence de l'ADNmt paternel et maternel ne semble donc pas très favorable au développement de l'embryon.

Les biologistes américains ont aussi constaté que leur stratégie pour maintenir l'ADNmt paternel était très transitoire. Les vers mutants qui se développaient parvenaient tout de même à l'éliminer, preuve que d'autres mécanismes sont à l'œuvre. Ils ont observé que les mitochondries paternelles



▲ *Les mitochondries, telles que celle-ci observée au microscope électronique (en rouge), fournissent de l'énergie aux cellules. Vestiges d'anciennes bactéries, elles contiennent de l'ADN.*

PROFESSORS P. MOTTA & T. NAGURO/SPL/COSMOS

restaient très isolées du réseau de mitochondries maternelles dans les cellules embryonnaires et qu'elles avaient une forme différente de celle des mitochondries maternelles. Sans qu'on en connaisse le signal moléculaire, la forme singulière et l'isolement des mitochondries paternelles les exposent à des mécanismes cellulaires de recyclage. Le premier d'entre eux est l'autophagie. Les cellules ont en effet la capacité de détruire et de recycler des structures internes endommagées comme des mitochondries entières. Autour de la mitochondrie à éliminer se forme un petit sac membranaire, l'autophagosome. Celui-ci la transporte dans un autre compartiment de la cellule, rempli de molécules capables de décomposer la mitochondrie et son ADN.

En 2011, Vincent Galy et son équipe ont observé ce phénomène lors de la fécondation chez *C. elegans* (2). « *Au microscope, grâce à des marqueurs spécifiques, on peut voir les protéines impliquées dans la formation des autophagosomes apparaître autour des mitochondries paternelles*, explique le biologiste. *Cela se produit seulement vingt minutes après la fécondation. C'est très flagrant ! C'est la seule autophagie qui se produise à un stade aussi précoce de la vie d'un organisme.* » Un autre mécanisme de dégradation peut aussi être mis à contribution, le protéasome. Ce mécanisme agit grâce à une molécule, l'ubiquitine, qui se fixe sur les protéines à éliminer. En 1999, l'équipe de Gérald Schatten, à l'université d'Oregon aux États-Unis, a démontré chez le bovin et le singe que les mitochondries spermatiques étaient marquées par l'ubiquitine après la fécondation (3).

AIDE À LA PROCRÉATION

Autophagie, intervention d'une endonucléase ou du protéasome… La démonstration a été faite que ces mécanismes sont utilisés pour éliminer les mitochondries spermatiques chez différentes espèces animales. Qu'en est-il chez l'homme ? Ces trois mécanismes sont bien présents dans les cellules humaines. On peut donc supposer qu'ils sont à l'œuvre lors de la fécondation humaine, ou au tout début du développement embryonnaire. « *La démonstration formelle n'a pas été faite, nous ne savons pas à quel moment les mitochondries spermatiques humaines sont éliminées*, souligne Julie Steffann, généticienne à l'hôpital Necker, à Paris. *Ce dont nous sommes sûrs, en revanche, c'est que les techniques de détection et de séquençage ne repèrent pas de mitochondries paternelles dans les embryons après des fécondations in vitro, ou chez les enfants quand on cherche à savoir s'ils sont porteurs de mutations de l'ADNmt.* »

Il reste néanmoins important d'approfondir le sujet, notamment pour améliorer les techniques médicales d'aide à la procréation. Par exemple, lorsqu'un homme a des dysfonctionnements de la spermatogénèse qui ne lui permettent pas de produire des spermatozoïdes matures, peut-on utiliser des spermatozoïdes pas totalement différenciés, au risque que leurs mitochondries n'aient pas les propriétés qui permettent leur reconnaissance et leur élimination ? « *Pour y répondre, il faut identifier les signaux moléculaires qui permettent le repérage des mitochondries spermatiques et leur destruction*, souligne Vincent Galy. *Et surtout savoir à quelle étape de la spermatogénèse ils sont installés : est-ce au stade final ou lors d'étapes très antérieures ?* » ■

(1) Q. Zhou *et al.*, *Science*, *353*, 394, 2016.
(2) S. Al Rawi *et al.*, *Science*, *334*, 1144, 2011.
(3) P. Sutovsky *et al.*, *Nature*, *402*, 371, 1999.

3

Comment l'embryon se divise-t-il ?

À la frontière entre biologie et physique, des recherches ont élucidé les mécanismes de la division de l'ovule. Une division qui permet à la cellule-œuf de conserver les réserves nutritives nécessaires au développement de l'embryon.

Marie-Émilie Terret et **Marie-Hélène Verlhac,** biologistes

Repères

- Les cellules de l'organisme sont issues de divisions qui répartissent symétriquement le matériel cellulaire entre les cellules filles.
- L'ovule, cellule sexuelle qui contient les premières réserves du futur embryon, est issu d'un mécanisme de division différent.
- Il s'agit d'une division asymétrique qui utilise des réseaux de filaments impliqués lors des premières divisions embryonnaires.



« Des souriceaux ont été créés sans ovules ! » C'est ce qu'annonçaient en septembre dernier certains médias, à la suite des travaux des groupes de Tony Perry à l'université de Bath au Royaume-Uni et de Christoph Klein à l'université de Ratisbonne en Allemagne (1). La réalité est tout autre. Les chercheurs ne se sont pas dispensés d'ovules pour effectuer leur expérience. Bien au contraire, puisque leurs travaux ont consisté à activer des ovules de souris de façon artificielle, c'est-à-dire à leur faire subir les réactions chimiques – un flux de calcium – induites par la pénétration du spermatozoïde. Ensuite, dans ces ovules activés artificiellement, ils ont injecté des têtes de spermatozoïde (là où se trouve l'ADN). Cette expérience a abouti à la naissance de souriceaux. Donc, jusqu'à preuve du contraire, l'ovule, le gamète femelle ou œuf, est bien indispensable à la reproduction et à la formation d'un nouvel individu.

Comme l'écrivait William Harvey, médecin anglais du XVIIe siècle, *ex ovo omnia* : « tout vient de l'œuf ». Aujourd'hui plus que jamais, cette cellule remarquable fait l'objet d'intenses recherches. En effet, depuis une trentaine d'années, l'âge moyen de la première grossesse augmente régulièrement dans nos sociétés développées. Or la fertilité féminine s'amoindrit avec l'âge, à la fois parce que les chances de conception diminuent, mais aussi du fait d'une moindre qualité des ovules. Il peut en découler des anomalies à l'origine de fausses couches et de défauts congénitaux. Il est dès lors crucial de comprendre comment cette cellule se constitue en quoi elle est unique, à commencer par sa capacité à donner un embryon viable une fois qu'elle est fécondée. Nous nous sommes particulièrement intéressées aux mécanismes de division cellulaire qui aboutissent à la formation de l'ovule. Des mécanismes en jeu lors des premières divisions cellulaires de l'embryon.

UNE DIVISION CELLULAIRE ASYMÉTRIQUE

Toutes les cellules se divisent à l'aide d'un système biomécanique spécialisé, le fuseau de division bipolaire. Il se compose de milliers de fibres protéiques, longues et cylindriques, les microtubules (*). C'est au milieu de ce fuseau que se fait la scissure qui va diviser une cellule mère en deux cellules filles. C'est là également que s'alignent les chromosomes avant d'être répartis entre les cellules filles. Dans les cellules non sexuelles (somatiques), une cellule prête à se diviser produit deux structures spéciales, les centrosomes (*). Ces derniers assurent l'assemblage du fuseau de division. Les microtubules du fuseau ainsi organisés « capturent » les chromo-

somes préalablement dupliqués. Ils les alignent au centre du fuseau. Puis, par un jeu d'allongement et de rétrécissement entre certains microtubules, chaque moitié de fuseau emporte le matériel cellulaire qui lui est attaché dans une des deux cellules filles. La division, parfaitement symétrique, crée ainsi deux cellules contenant la même quantité de chromosomes (Fig. 1A).

L'ovule, lui, provient d'un processus différent. Cette grosse cellule sexuelle (0,2 mm chez la femme), qui stocke les réserves maternelles nécessaires au développement embryonnaire, est le produit d'un processus particulier de division nommé méiose (*) (Fig. 1B). Durant la méiose, une cellule produite par l'ovaire, l'ovocyte, se divise deux fois. Mais ces deux divisions, contrairement au cas des cellules somatiques, ne donnent pas deux cellules parfaitement identiques à chaque fois. Elles conduisent à la formation d'une part, de l'ovule, d'autre part, de deux cellules minuscules, appelées globules polaires. Cette asymétrie est importante pour le futur embryon, puisque la taille et les réserves de l'ovule qui lui sont transmises en dépendent. Mais comment une division cellulaire peut-elle être asymétrique ? Est-ce l'effet du hasard ou au contraire d'un mécanisme parfaitement « huilé » ?

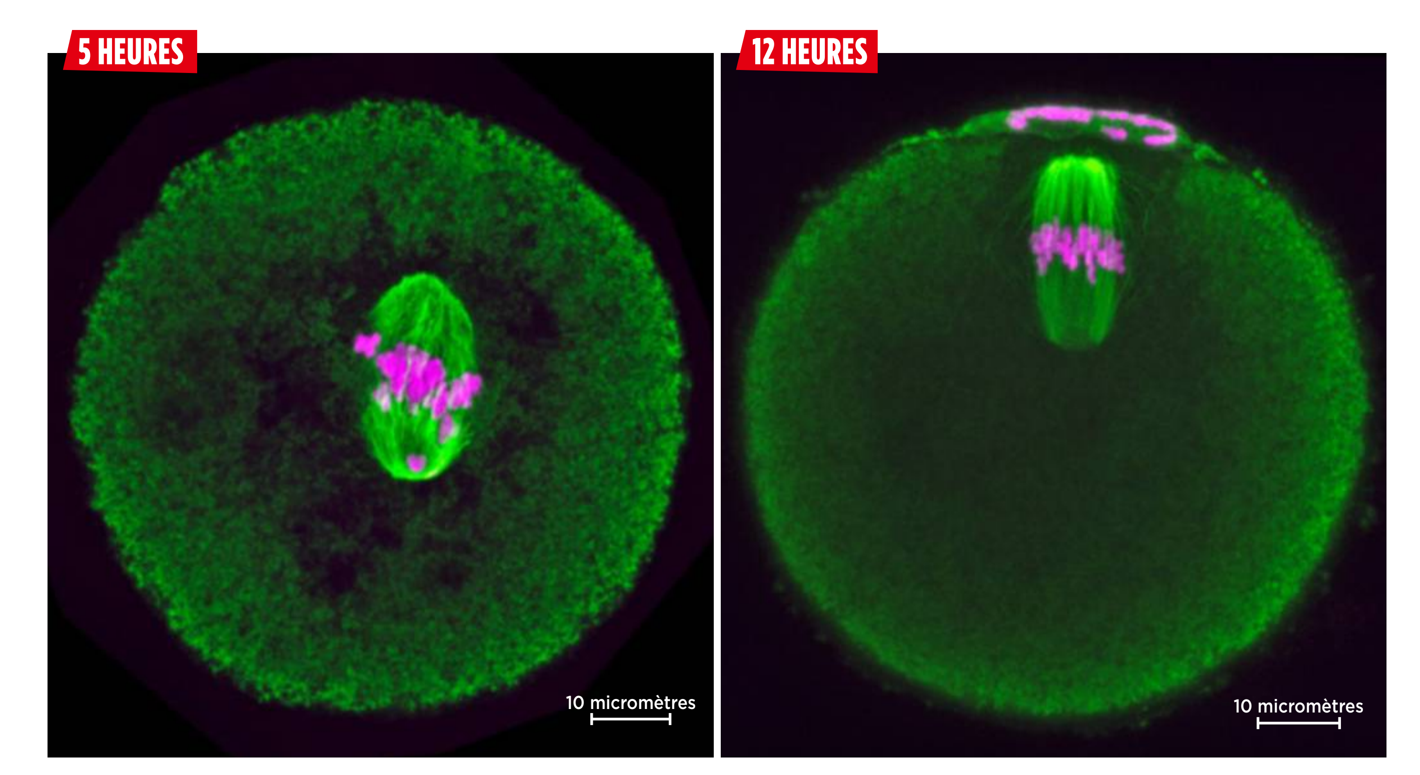
Pour le comprendre, revenons un instant aux cellules somatiques. Dans ces cellules, les deux centrosomes contrôlent non seulement l'assemblage du fuseau de division mais aussi son positionnement. En effet, ils émettent des microtubules particuliers, dits « astraux », qui connectent le fuseau à une couche spécialisée du cytoplasme, qui soutient la face interne de la membrane cellulaire, le cortex cellulaire. Or ce cortex est rigidifié par la présence d'une protéine contractile, la myosine II, que l'on retrouve également dans les muscles et qui permet leur contraction. Chaque centrosome relié au cortex est donc stabilisé dans la cellule, un peu comme un navire s'amarre à un quai. En tirant ou en poussant sur le cortex, qui sert de point d'ancrage, les microtubules astraux positionnent donc mécaniquement le fuseau au centre de la cellule mère. Celle-ci donnera donc deux cellules filles de taille identique.

Les ovocytes d'espèces telles que la drosophile, le ver nématode *Caenorhabditis elegans,* l'homme ou la souris sont quant à eux privés de centrosomes et de microtubules astraux (ils perdent leurs centrosomes au début de la méiose). Chez la souris, qui sert de modèle d'étude (malgré quelques différences avec •••

(*) **Les microtubules** sont des tubes creux de 0,025 micromètre de diamètre constitués de protéines, les tubulines. Ils constituent, à côté des filaments d'actine (trois fois plus fins), l'un des composants essentiels du squelette cellulaire.

(*) **Le centrosome** est une structure entourée d'un matériel riche en diverses protéines. C'est le centre majeur d'organisation des microtubules dans les cellules.

(*) **La méiose** est une forme de division cellulaire particulière qui concerne les cellules germinales, à l'origine des cellules sexuelles, ou gamètes.



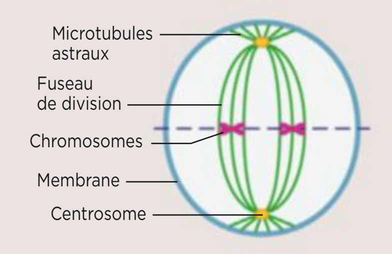
▼ *Un ovocyte de souris se divise. Son fuseau de division (en vert) migre du centre (5 heures) vers l'extrémité de la cellule (7 heures). C'est au milieu de ce fuseau que se fera la scissure entre les deux futures cellules (en rose, les chromosomes).*

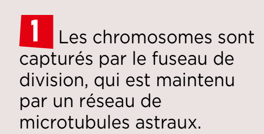
LABO VERLHAC

Fig.1 Deux principes de division

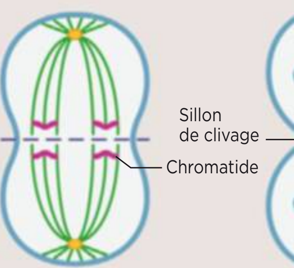
A. La division symétrique d'une cellule (mitose)

Dans un premier temps, L'ADN se duplique et se compacte en forme de chromosomes. Un fuseau de division apparaît.

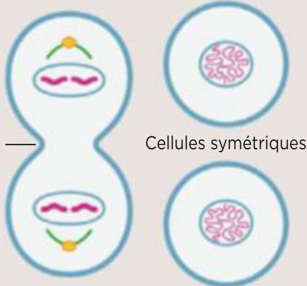




1 Les chromosomes sont capturés par le fuseau de division, qui est maintenu par un réseau de microtubules astraux.

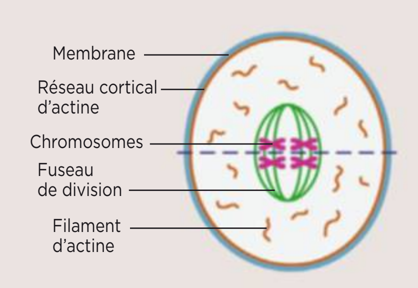


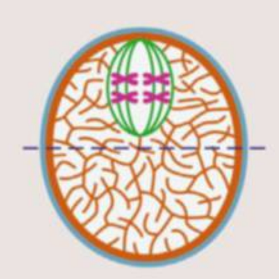
2 Chaque moitié du fuseau emporte de son côté les chromosomes.

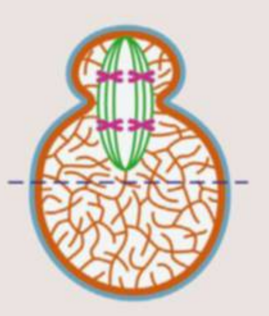


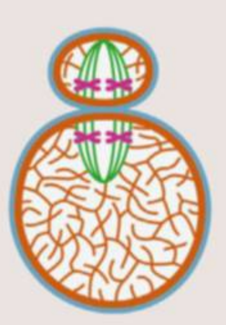
3 Deux noyaux se forment. La cellule peut se diviser et donner deux cellules symétriques, appelées cellules filles.

B. La division asymétrique de l'ovocyte (première phase de la méiose)









1 Les chromosomes sont capturés par le fuseau de division. Deux réseaux de filaments, composés d'actine, une protéine, se forment : un réseau cortical d'actine suit la membrane de l'ovocyte, et un autre réseau envahit l'intérieur de l'ovocyte comme un « filet de pêche ».

2 Les deux réseaux d'actine se développent. Le réseau dit « filet de pêche » tracte le fuseau de division vers un pôle de la cellule. Chaque extrémité du fuseau est fixée à l'un des réseaux d'actine.

3 Chaque moitié du fuseau emporte de son côté les chromosomes.

4 L'ovocyte se scinde en deux cellules asymétriques.

INFOGRAPHIE : SYLVIE DESSERT

••• l'espèce humaine), on observe au microscope que le fuseau de division se forme d'abord dans la région centrale de l'ovocyte... mais qu'il se déplace ensuite vers la périphérie. Vous vous doutez probablement que c'est de là que provient la division asymétrique propre aux ovocytes. Et vous avez raison. Mais comment l'ovocyte parvient-il à faire migrer le fuseau de division vers son cortex ? Ce point est crucial car la taille de l'ovule qui résultera de la division en dépend, et donc les réserves nutritives de l'embryon. Que la migration du fuseau n'ait pas lieu, et l'ovule résultant sera de trop petite taille. Des recherches menées depuis les années 1990 par plusieurs équipes, dont la nôtre, ont montré que le positionnement du fuseau de division de l'ovocyte ne dépend pas des microtubules. Il dépend uniquement de la mécanique de filaments constitués d'une protéine, l'actine. Ces filaments s'organisent en deux réseaux, qui connectent le fuseau de division au cortex de la cellule. Le premier réseau a l'allure d'un filet de

pêche et remplit tout le cytoplasme de la cellule. Le second, appelé réseau cortical, ressemble à une pâte réticulée formant un épaississement au niveau du cortex.

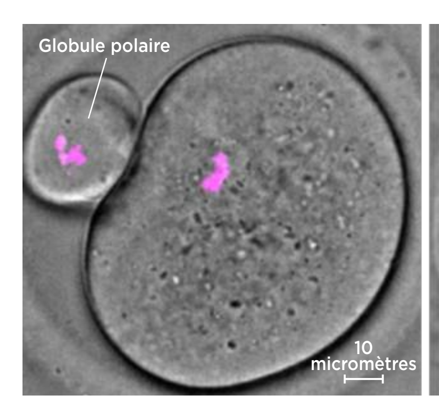
UN CORTEX RAMOLLI FAVORISE LA MIGRATION

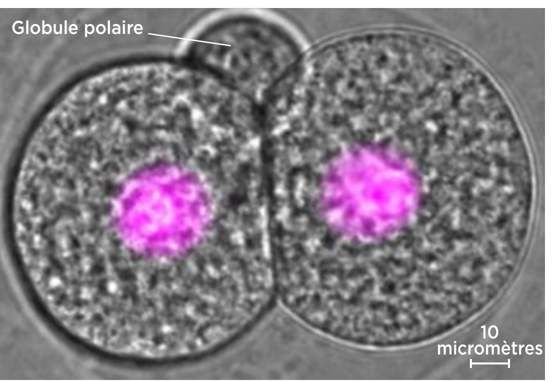
En 2010, Stephanie Larson et ses collègues de l'université Johns-Hopkins, à Baltimore aux États-Unis, ont découvert que la pression exercée par le cortex sur la membrane des ovocytes diminue lors de leur division. Cela revient à ramollir les ovocytes, à l'inverse de ce qui se passe dans une cellule somatique en division (2). En 2013, notre équipe a compris pourquoi, en montrant que ce ramollissement résulte de l'absence de myosine II, cette protéine qui, dans les cellules somatiques, rigidifie le cortex (3). Plus précisément, on peut observer expérimentalement que la myosine II est « chassée » progressivement du cortex de l'ovocyte durant la première division de la méiose (méiose I) par le réseau cortical d'actine.
Mais à quoi peut bien servir ce ramollissement cortical ? Eh bien, un cortex mou peut se déformer et ainsi produire une plus grande surface d'ancrage pour les fibres qui vont tirer sur le fuseau, amplifiant le déplacement de celui-ci. Étant donné que l'autre réseau d'actine – le « filet de pêche » – enserre le fuseau de division dans le cytoplasme, il suffit qu'une force s'exerce sur les deux réseaux d'actine connectés pour déplacer le fuseau. Cette force, c'est la myosine II qui la produit. Ses fibres s'ancrent sur les deux réseaux d'actine et effectuent une traction assurant le mouvement du fuseau vers le cortex le plus proche, un peu comme un moteur qui remonte un chalut.

Cependant, notre groupe a démontré expérimentalement que trop ramollir le cortex empêche la migration du fuseau, ce qui est logique puisqu'un cortex trop mou ne peut être générateur de forces (4). Trop de rigidité a tendance à ralentir cette migration. Ainsi, une fenêtre étroite de tension corticale guide le positionnement du fuseau dans l'ovocyte de souris, et donc la réalisation d'une division asymétrique. Nous avons découvert, en particulier en étudiant des souris génétiquement modifiées, que cette tension optimale est régulée par ce que l'on appelle une cascade de signalisation – la voie Mos/MAPK –, dont la fonction est d'activer certaines protéines. Mais nous n'en connaissons pas encore tous les détails.

Une fenêtre étroite de tension corticale guide le positionnement du fuseau, et donc la réalisation d'une division asymétrique

Par la suite, après la fécondation de l'ovule, des mécanismes du même type agissent dans l'embryon, à la différence près que l'embryon se divise symétriquement ! Une régulation différente du positionnement du fuseau de division s'opère alors (lire p. 46). Le potentiel de développement des embryons humains au stade 1-cellule (ou zygotes), ou plus âgés, peut d'ailleurs être prédit de manière précise par leurs propriétés mécaniques. On utilise pour cela la technique que nous avons appliquée aux ovocytes de souris : elle consiste à aspirer la cellule embryonnaire ou l'embryon dans une pipette de verre et à enregistrer sa déformation en fonction •••





Division asymétrique de l'ovocyte (à g.) : le premier globule polaire apparaît (à gauche de l'ovocyte). Division symétrique de l'embryon (à dr.) : le second globule polaire se place entre les deux cellules filles, sur le zygote.

LABO VERLHAC

POURQUOI LA PREMIÈRE DIVISION DE L'EMBRYON EST SYMÉTRIQUE

Chez la souris, la première division embryonnaire après la fécondation de l'ovocyte par un spermatozoïde est complètement symétrique, donnant naissance à deux cellules filles de taille identique, les blastomères. Pourtant, un embryon au stade 1-cellule, ou zygote, ressemble énormément à un ovule: c'est une cellule ronde, isolée et toujours privée de centrosomes. Comment fait-elle pour centrer le fuseau de division? Nous avons montré que trois étapes sont nécessaires.

1. Le zygote doit centrer grossièrement les noyaux mâles et femelles (ou pronoyaux) venant de l'ovocyte et du spermatozoïde. Pour cela, le premier réseau d'actine met le cytoplasme en mouvement grâce à des « moteurs moléculaires », notamment la myosine V. Le cytoplasme devient fluide grâce à ce brassage, permettant le transport des gros objets que sont les pronoyaux.

2. La tension corticale augmente grâce à la myosine II (présente à nouveau dans le cortex), ce qui met le fuseau de division sous tension, un peu comme le ferait un élastique, si bien qu'il se positionne précisément au centre géométrique du zygote.

3. Le fuseau est maintenu passivement au centre du zygote jusqu'à la séparation des chromosomes, grâce sans doute à une élévation de la viscosité du cytoplasme qui « fige » le fuseau (1). Le mécanisme de contrôle de la tension corticale (la voie Mos/MAPK), qui permet le recrutement de la myosine II dans le cortex des ovocytes, disparaît dans les embryons. Il laisse peut-être la place aux mécanismes qui sont à l'œuvre lors de la division mitotique. Il sera intéressant à l'avenir de déterminer si c'est bien le cas.

(1) A. Chaigne *et al., Nat. Commun., 7,* 10253, 2016.

••• de la pression exercée. L'application de lois physiques, comme la loi de Laplace (*), permet ensuite d'extrapoler ses propriétés mécaniques. Une telle technique n'abîme pas les cellules, qui continuent à se diviser normalement. Elle pourrait être facilement mise en œuvre dans les protocoles de procréation assistée afin de sélectionner les embryons viables qui seront réimplantés in utero. Jusqu'à présent, cette sélection se fait sur des critères morphologiques à des stades plus tardifs; elle est donc plus empirique et dommageable pour l'embryon car il est mis en culture plus longtemps avant d'être réimplanté.

En fait, toutes les cellules ont des mécanismes de surveillance qui stoppent le processus de division quand une erreur survient. Par exemple, si les chromosomes ne sont pas bien alignés sur le fuseau de division, la division s'arrête, ce qui donne le temps à la cellule de positionner correctement ses chromosomes. Toutefois, si ce mécanisme de surveillance ne fonctionne pas correctement, la cellule se divisera malgré la présence de chromosomes mal alignés. Ils ne seront donc pas séparés en deux lots égaux entre cellules filles, pouvant générer ce que l'on appelle l'aneuploïdie (*). Dans le cas de l'embryon, l'aneuploïdie entraîne des anomalies congénitales et des fausses couches. La moitié des fausses couches sont dues à une aneuploïdie des cellules embryonnaires (5).

DES ANOMALIES RETROUVÉES DANS LES CELLULES CANCÉREUSES

Dans les ovocytes et les embryons précoces, les recherches ont montré que ce mécanisme de surveillance est moins robuste que dans les cellules somatiques. Cela explique en partie pourquoi la formation des ovules est un processus naturellement prédisposé aux erreurs, quel que soit l'âge de la femme. De ce fait, au moins 10 % des grossesses produisent des embryons n'ayant pas le bon nombre de chromosomes, atteints notamment de trisomies (les plus fréquentes à la naissance étant les trisomies 16, 18 et 21). Cependant, les erreurs de ségrégation des chromosomes deviennent plus fréquentes avec l'âge maternel, si bien que le pourcentage d'aneuploïdie et notamment de trisomies évolue de façon exponentielle à partir de 35 ans. Fait intéressant, on retrouve un taux d'erreurs élevé dans certaines cellules cancéreuses ayant un nombre aberrant de centrosomes, supérieur à deux. Nous avons montré qu'elles assemblent leur fuseau de façon similaire à celle des ovocytes. Cela pourrait donc influer sur les erreurs de ségrégation des chromosomes qu'on retrouve dans certaines cellules cancéreuses. La dérégulation de la tension corticale en méiose, mais aussi peut-être dans certaines cellules cancéreuses, souvent ramollies, pourrait également contribuer à ce phénomène. Les études de la mécanique de division des ovocytes ont ainsi des applications non seulement en biologie de la reproduction, afin d'améliorer les techniques de procréation assistée, mais aussi pour comprendre d'autres systèmes cellulaires, tels que certaines cellules cancéreuses. ■

(*) **La loi de Laplace** est une loi qui lie la courbure de l'interface séparant deux milieux (ici, la membrane de la cellule embryonnaire) à la différence de pression entre ces deux milieux.

(*) **L'aneuploïdie** caractérise une cellule dotée d'un nombre anormal de chromosomes. Cette anomalie génétique est due à une mauvaise répartition des chromosomes durant la division de sa cellule mère.

(1) T. Suzuki *et al., Nat. Commun., 13,* 12676, 2016.
(2) S. M. Larson *et al., Mol. Biol. Cell, 21,* 3182, 2010.
(3) A. Chaigne *et al., Nat. Cell Biol., 15,* 958, 2013.
(4) A. Chaigne *et al., Nat. Commun., 6,* 6027, 2015.
(5) M. M. J. van den Berg *et al., BBA - Molecular Basis of Disease, 1822,* 1951, 2012.

4

Pourquoi l'immunité tolère-t-elle l'embryon ?

L'implantation de l'embryon dans l'utérus est un paradoxe immunologique. Il devrait être rejeté par les cellules immunitaires maternelles. Pourtant, l'activation de ces dernières est essentielle à l'implantation et au bon déroulement de la grossesse.

Oriane Dioux, journaliste

Repères

▪ Lorsque l'embryon s'implante dans la muqueuse utérine, ses cellules entrent en contact avec les cellules immunitaires de la mère.

▪ Les cellules embryonnaires ont la particularité de n'activer que certaines cellules immunitaires, les cellules *« uterine natural killer »* (uNK).

▪ Ces cellules uNK ont un double rôle : favoriser le développement des cellules embryonnaires à l'origine du placenta et protéger la muqueuse utérine des virus.

Pourquoi un embryon n'est-il pas considéré comme un corps étranger par le système immunitaire maternel ? Ses cellules présentent en effet à leur surface des molécules produites à partir de gènes hérités pour moitié du père et pour moitié de la mère. Ces molécules, qui forment le complexe majeur d'histocompatibilité (CMH), sorte de « carte d'identité immunologique » propre à chaque individu, sont donc bel et bien différentes de celles de la mère. Le système immunitaire de celle-ci devrait les reconnaître comme étrangères et rejeter l'embryon comme il rejette une greffe. Pourtant, ce n'est pas le cas.

Ce paradoxe, soulevé par Peter Medawar, immunologiste britannique et Prix Nobel de médecine en 1960, a ouvert la voie à un vaste champ de recherches. De façon étonnante, celles-ci révèlent que l'embryon ne doit pas passer inaperçu des cellules immunitaires pour réussir à s'implanter dans la muqueuse utérine. Au contraire, c'est une première réaction immunitaire qui favorise l'adhésion de l'embryon à la muqueuse utérine, appelée aussi endomètre, lorsqu'il atteint la cavité utérine. *« L'utérus est la plupart du temps un tissu "anti-adhésif"*, explique Nathalie Lédée, spécialiste de l'immunité de la gestation à l'Inserm. *Mais à chaque cycle, il se prépare à l'arrivée éventuelle d'un embryon pendant une période de quatre jours, appelée fenêtre d'implantation. Sous l'effet d'une hormone, la progestérone, il se produit alors un basculement complet de son répertoire en cellules immunitaires. La progestérone recrute des lymphocytes T régulateurs. Ces derniers vont permettre de remplacer les lymphocytes B et T CD8 par des cellules de l'immunité dite innée* (*)*. L'arrivée des cellules de l'immunité innée entraîne une réaction inflammatoire qui fait perdre à l'utérus ses propriétés anti-adhésives et permet à l'embryon d'adhérer à l'endomètre. »*

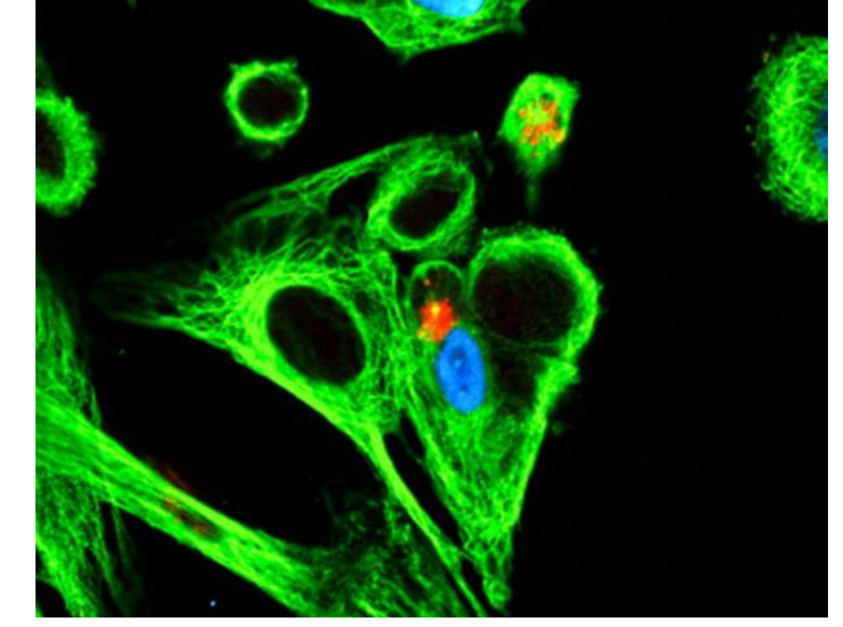
Alors âgé de 5 à 6 jours, l'embryon est composé d'une cavité remplie de liquide et d'un bouton embryonnaire à l'origine du fœtus. L'ensemble est entouré par une couronne de cellules, le trophoblaste, qui plus tard formera le placenta. Le rôle de ces cellules est décisif. Après l'adhésion de l'embryon, les cellules du trophoblaste se divisent et envahissent l'endomètre. Les molécules du CMH exprimées à leur surface entrent ainsi en contact avec les cellules immunitaires maternelles. Mais les cellules du trophoblaste ont la particularité de ne présenter que certaines molécules du CMH, dites de classes I (les molécules HLA C, G et E), qui varient peu d'un individu à l'autre. Les molécules du CMH de classe II, qui interviennent dans l'activation de toute une catégorie de lymphocytes, sont quant à elles absentes, permettant ainsi de ne pas activer les lymphocytes qui pourraient détruire l'embryon.

Toutefois, les molécules du CMH de l'embryon activent un autre type de cellules immunitaires. Il s'agit des cellules utérines « tueuses », appelées uNK pour « *uterine natural killer* ». Ces cellules de

l'immunité innée font partie des cellules recrutées au sein de l'endomètre lors de la fenêtre d'implantation. Leur présence et leur activation ont de quoi surprendre : leur rôle est notamment de tuer les cellules qui portent des protéines étrangères à leur surface, comme les cellules infectées par un virus… et a priori l'embryon ! *« Si l'on enlève les cellules uNK chez la souris, on s'attend à ce qu'il n'y ait aucun problème de rejet,* note Gérard Chaouat, de l'Institut universitaire d'hématologie, à Paris. *Cette expérience réalisée en 1999 a pourtant montré le contraire ! L'équipe d'Anne Croy, de l'université de Guelph, au Canada, a eu la surprise de constater que la grossesse ne pouvait pas être menée à terme. En revanche, elle redevenait normale si on injectait des cellules uNK aux souris déficientes* (1)*. Ce qui montre bien qu'elles sont indispensables au maintien de la gestation. »*
Cependant, au sein de l'endomètre, le rôle de ces cellules uNK, qui représentent 70 % des cellules immunitaires présentes dans ce tissu, est très différent de celui des cellules « tueuses » présentes dans le sang. Il ne s'agit plus de tuer mais de sécréter des facteurs de croissance qui favorisent la transformation des artérioles en artères spiralées, plus larges. Cette transformation de la muqueuse utérine permet d'irriguer l'embryon en oxygène et en éléments nutritifs.

SOUTIEN ET DÉFENSE

L'embryon favorise donc son implantation par l'intermédiaire des molécules de sa « carte d'identité immunologique », mais pas seulement. Il libère une hormone, l'hormone gonadotrophique chorionique (hCG), qui joue également un rôle clé. *« C'est une hormone propre à l'humain et plus généralement aux primates,* souligne Virginie Gridelet, du Centre d'immuno-endocrinologie et d'embryologie du CHU de Liège, en Belgique. *Sa production permet de contrôler l'implantation de l'embryon, qui est beaucoup plus profonde chez l'homme que chez toutes les autres espèces. »*
L'invasion des cellules de l'embryon est d'ailleurs si phénoménale qu'elle est comparée au processus d'invasion des cellules cancéreuses. La hCG favorise son bon déroulement en permettant le recrutement de nouveaux effectifs de cellules uNK. Celles-ci viennent prêter main-forte aux cellules uNK déjà présentes. En sécrétant elles aussi des facteurs de croissance, elles participent au développement du système vasculaire de l'endomètre et à la formation du placenta. L'hormone recrute également de nouveaux lymphocytes T régulateurs. Cela permet de conserver la prédominance des cellules de l'immunité innée au sein de la muqueuse et d'éloigner ainsi le risque de rejet de l'embryon par les cellules de l'immunité adaptative (*). *« Si on est prudent sur le succès d'une grossesse pendant les trois premiers mois, c'est justement parce que cette étape est délicate et qu'elle nécessite l'action coordonnée de ces cellules pour éviter le rejet de l'embryon et développer la vascularisation »,* pointe Nathalie Lédée.
Bien que l'immunité soit modulée pour permettre l'implantation, l'endomètre reste capable de faire face aux infections. Les travaux de Philippe Le Bouteiller, directeur de recherche au Centre de physiopathologie de Toulouse, ont en effet montré que les cellules uNK retrouvent leur potentiel « tueur » lorsque les cellules de l'endomètre sont infectées par un virus pathogène, comme le cytomégalovirus (2). L'implantation de l'embryon serait donc en partie le résultat d'un subtil équilibre entre les fonctions de soutien et de défense des cellules uNK. Chez des femmes souffrant d'infertilité, Nathalie Lédée a montré que pour plus de 80 % d'entre elles, l'endomètre n'était pas prêt à recevoir l'embryon (3). Soit parce que les cellules uNK n'étaient pas recrutées en nombre suffisant pour favoriser le développement de l'embryon. Soit parce que leurs fonctions de défense étaient trop stimulées, les conduisant à s'attaquer aux cellules de l'embryon. ■



▲ *Lorsque les cellules de la muqueuse de l'utérus sont infectées par un virus pathogène, le cytomégalovirus (en bleu), les cellules utérines tueuses (en rouge) les attaquent. Elles épargnent en revanche l'embryon.*

NABILA JABRANE-FERRAT/INSERM

(*) **Le système immunitaire inné** comprend les cellules et les mécanismes permettant la défense de l'organisme contre les agents infectieux de façon immédiate.

(*) **Le système immunitaire adaptatif** procure une protection plus tardive mais plus durable.

(1) B. A. Croy *et al., Biology of Reproduction, 56,* 1, 1999.

(2) P. Le Bouteiller *et al., Frontiers of immunology, PloS Pathogens, 9,* 4, 2013.

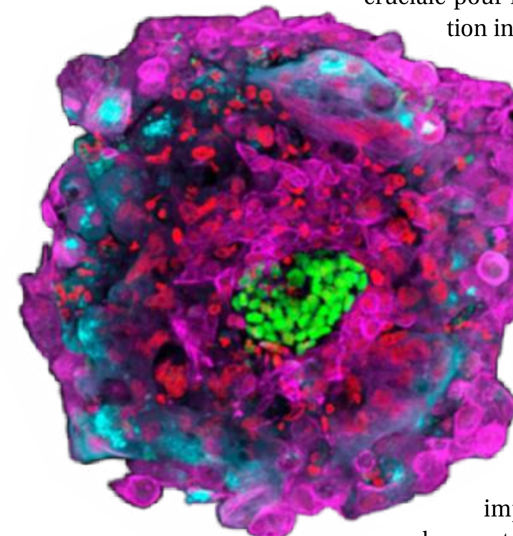
(3) N. Lédée *et al., American Journal of Reproductive Immunology, 75,* 388, 2016.

5

Peut-on cultiver in vitro les embryons humains ?

En juin dernier, des biologistes annonçaient avoir cultivé des embryons humains in vitro jusqu'au 14e jour après la fécondation, soit 7 jours de plus que la durée atteinte jusqu'à présent. Selon l'embryologiste Hilde Van de Velde, cette expérience mérite d'être approfondie.

Propos recueillis par Anne Debroise



Au 12e jour de culture in vitro, on observe les cellules à l'origine de l'embryon humain (en vert) et celles qui vont former notamment le placenta (en bleu et en magenta).

GIST CROFT, ALESSIA DEGLINCERTI, ALI H. BRIVANLOU/ THE ROCKEFELLER UNIVERSITY

La Recherche **Deux équipes de l'université de Cambridge, au Royaume-Uni, et de l'université Rockfeller, aux États-Unis, ont pu cultiver des embryons 14 jours après la fécondation. En quoi est-ce intéressant ?**
Hilde Van de Velde Cela couvre une période cruciale pour les spécialistes de la fécondation in vitro (FIV), entre 6 et 10 jours après la fécondation. C'est à ce moment qu'a lieu l'implantation de l'embryon dans l'utérus. Dans 60 % des cas, les embryons transférés ne s'implantent pas et la FIV ne fonctionne pas. Parfois, vous transférez un embryon qui, selon les critères morphologiques utilisés au niveau international, semble avoir toutes les chances de s'implanter, et cela ne prend pas. Parfois, vous implantez des embryons moins beaux et cela fonctionne. Avec certains couples, les implantations semblent faciles mais elles conduisent à des fausses couches récurrentes. Nous ne savons pas pourquoi et nous avons vraiment besoin de mieux comprendre ce qui se passe à ce moment-là.

Cette expérience est-elle une première ?
Oui, les équipes de l'université de Cambridge et de l'université Rockfeller ont été les premières à publier de tels résultats (1, 2), et ceux-ci sont importants. Dans le cadre de la fécondation in vitro, nous avons l'habitude d'observer le développement des blastomères (les cellules de l'embryon) entre 0 et 6 jours après la fécondation. Le 5e jour, l'embryon est composé de seulement deux types de cellules : le « trophectoderme », qui forme une sphère creuse, et une masse cellulaire interne à l'intérieur de la sphère. C'est à ce moment-là que nous les transférons, mais nous pouvons les élever jusqu'au 6e ou 7e jour pour les congeler. Le 6e jour, la masse cellulaire interne commence tout juste à se différencier (lire p. 36). Après, c'était une boîte noire. Nous ne savions pas grand-chose de ce qui se produisait.

Sur quel type d'embryon ces expériences ont-elles été menées ?
Sur des embryons qui ne font plus l'objet d'un projet parental. De fait, en Belgique, en France comme au Royaume-Uni, les couples qui ont fait congeler des embryons dans le cadre d'un projet de FIV peuvent les donner à des fins de recherche scientifique quand leur projet prend fin.

Comment ces équipes ont-elles réussi à les cultiver in vitro ?
Il s'agit d'un protocole relativement simple qui

avait été développé deux ans auparavant sur des embryons de souris (3) : les embryons, âgés de 5 à 6 jours, ont été déposés sur une couche de gel nappant le fond de plaques de culture transparentes. Ils ont été ensuite cultivés dans différents milieux successifs, enrichis en nutriments, en hormones et en d'autres facteurs connus pour activer le développement embryonnaire, provoquer la prolifération cellulaire et la différenciation. Le 7e jour, les embryons avaient adhéré à la plaquette et continué leur développement, sans pouvoir toutefois envahir la muqueuse utérine comme ils l'auraient fait in vivo. Or, malgré l'absence de tissu maternel, l'équipe de Magdalena Zernicka-Goetz, à Cambridge, a observé la formation de diverses structures typiques de la 2e semaine de développement embryonnaire (lire p. 52), comme les cellules pluripotentes de l'embryon ou la cavité amniotique.

Y aura-t-il des applications cliniques ?

Pas pour le moment, car ce sont des recherches très fondamentales. Mais d'ici à une dizaine d'années, quand nous aurons mieux compris ce qui se passe lors de l'implantation de l'embryon dans l'utérus, nous serons en mesure d'aider des patients. Il ne s'agira pas seulement d'améliorer le taux de réussite des FIV. Lors d'une conception naturelle, une implantation anormale peut être à l'origine de nombreuses fausses couches précoces, de difficultés à concevoir. On pourra peut-être aussi mieux prévenir les défauts de formation du placenta, qui conduisent à une hypertension artérielle grave chez la femme enceinte, pouvant aller jusqu'à des crises de convulsion (éclampsies) mortelles.

Pour les auteurs, cette expérience démontre que l'implantation de l'embryon et son évolution entre le 6e et le 13e jour ne nécessitent pas l'intervention des tissus maternels. Ils soulignent les étonnantes capacités à s'organiser de l'embryon. Est-ce une surprise ?

En réalité, je ne suis pas tout à fait certaine que les embryons obtenus soient complètement normaux. L'équipe a pu identifier un certain nombre de types de cellules extra-embryonnaires, comme celles qui constituent le placenta, en marquant des protéines qui les caractérisent, mais nous n'avons pas la preuve que tous les types cellulaires qui devraient être apparus au 13e jour sont bien présents. Par ailleurs, les chercheurs n'ont pas pu mener d'analyse génétique


DR

HILDE VAN DE VELDE

1996 Embryologiste clinicienne à l'hôpital universitaire néerlandophone de Bruxelles.
2009 Coordinatrice de la recherche en fécondation in vitro au centre de médecine reproductive de l'université néerlandophone de Bruxelles.
2013 Membre de la Commission fédérale pour la recherche médicale et scientifique sur les embryons in vitro.

sur les cellules embryonnaires obtenues. On ne sait donc pas s'ils sont génétiquement normaux. Autre chose : les embryons ont été cultivés en deux dimensions, sur des plaques de culture. Ils apparaissent plus aplatis que des embryons in vivo. Il faudrait pouvoir les cultiver dans un système à trois dimensions pour qu'ils aient un aspect plus naturel. Enfin, ils n'ont pas pu caractériser l'épiblaste, c'est-à-dire les cellules qui formeront le corps de l'embryon proprement dit. Ils ne disposaient en effet pour l'identifier que d'un seul marqueur, ce qui ne suffit pas pour observer la différenciation des tissus.

Qu'apprend-on sur les cellules souches embryonnaires pluripotentes, ces cellules capables de donner n'importe quel type de cellule de notre organisme ?

On en sait plus sur leurs origines. Chez la souris, elles trouvent leur origine dans la masse cellulaire interne qui se forme avant l'implantation de l'œuf. Mais chez l'homme, elles •••

L'EMBRYON HUMAIN DE 6 À 14 JOURS

À la fin du 6e jour de développement, le blastomère humain est composé d'une centaine de cellules. Il forme comme une balle creuse qui enferme un groupement de cellules (la masse cellulaire interne).
Au cours des jours suivants, deux populations cellulaires distinctes émergent de la masse cellulaire interne : les cellules extra-embryonnaires (l'endoderme primitif, le futur sac vitellin), et les cellules pluripotentes (épiblastes) de l'embryon.
Au 10e jour, la future cavité amniotique se forme. Puis apparaît une deuxième cavité, la cavité du sac vitellin, qui formera le cordon ombilical.
Au 12e jour, l'endoderme primitif (cellules périphériques) se structure et se différencie. On voit apparaître des cellules à plusieurs noyaux séparées par des lacunes où s'insèrent les vaisseaux sanguins maternels : le placenta se forme.

••• apparaissent après l'implantation et on n'en connaissait donc pas l'origine. En 1998, une équipe de l'université du Wisconsin a montré qu'on pouvait en obtenir en faisant évoluer en culture des cellules germinales issues d'un embryon de 5 jours (blastocyste). En 2008, nous avons montré qu'on pouvait même prélever une des quatre premières cellules de l'embryon, âgé seulement de 48 heures, pour obtenir des lignées de cellules souches (4). Mais les cellules souches embryonnaires pluripotentes se forment naturellement plus tard. L'équipe anglo-saxonne a détecté une protéine caractéristique des cellules souches embryonnaires humaines au 10e jour après la fécondation. Cela suggère que les cellules souches embryonnaires humaines apparaissent vers 9-10 jours.

Avec cette expérience, a-t-on fait un pas vers la conception d'humains hors du corps d'une femme ?

Absolument pas. Nous sommes dans des recherches très fondamentales. Les embryons sont cultivés dans un système à deux dimensions, simplement attachées sur un gel. On est sans doute allés aussi loin qu'on le pouvait sans créer d'utérus artificiel. Pour dépasser ce stade, l'embryon aura besoin d'un placenta pour lui apporter des nutriments et retirer les déchets qu'il produit.

Magdalena Zernicka-Goetz plaide pour un allongement de la limite de culture in vitro de 14 jours afin de permettre aux chercheurs de comprendre la suite du développement de l'embryon. Qu'en pensez-vous ?

Dans de nombreux pays, les lois de bioéthique estiment qu'à partir de 14 jours on ne peut plus faire d'expérience sur un embryon. Cette limite a été fixée parce que c'est à cette période que l'on commence à voir les prémices du système nerveux de l'embryon et on peut imaginer qu'il va ressentir de la douleur. On peut repousser cette limite de 5 jours de plus, mais il faudra de toute façon s'arrêter quelque part. Moi, j'estime qu'il y a une limite et je ne réfléchis pas à la possibilité qu'elle change. Je m'y conforme car il faut bien poser une limite, sinon on peut imaginer des expériences folles, comme créer de toutes pièces un être humain. Je pense qu'on apprendra déjà beaucoup en explorant mieux cette période de 6 à 14 jours. ■

(1) A. Deglincerti *et al.*, *Nature*, *533*, 251, 2016.
(2) M. N. Shahbazi *et al.*, *Nature Cell Biol.*, *18*, 700, 2016.
(3) I. Bedzhov *et al*, *Nature Protocols*, *9*, 2732, 2014.
(4) H. Van de Velde, *Hum. Reprod.*, *23*, 1742, 2008.

Pour en savoir plus

La Recherche a publié
- C. Klingler, « Pourquoi la mère ne rejette pas le fœtus », n°468, octobre 2012, p. 52.
- A. Debroise, « Le cerveau de l'embryon sous le contrôle du placenta », n°453, juin 2011, p. 20.
- D. Sicard, « Le caractère unique d'un embryon fait qu'il est tout sauf une fabrication rationnelle », n°438, février 2010, p. 82.
- C. Klingler, « Comment prédire l'implantation de l'embryon », n°421, juillet-août 2008, p. 16.

Livres
- Arnold Munnich, *Programmé mais libre, les malentendus de la génétique*, Plon, 2016.
- Erri De Luca, Paolo Sassone-Corsi, *Le Cas du Hasard, escarmouches entre un écrivain et un biologiste*, Gallimard, 2016.
- Axel Kahn, Anna Alter, *Les gènes, ce qu'on ne sait pas encore*, Le Pommier, 2014.
- René Frydman, *Dieu, la Médecine et l'Embryon*, Odile Jacob, 2003.

Rapports
- Note du comité d'éthique de l'Inserm, « État de la recherche sur l'embryon humain et propositions », 2014.
- André Chancholle, Claude Sureau, « La vie à son début », Médecine Sciences Publications, 2011.
- Avis du Comité consultatif national d'éthique, « Une réflexion éthique sur la recherche sur les cellules d'origine embryonnaire humaine, et la recherche sur l'embryon humain in vitro », 2010.
- Loi n° 2011-814 du 7 juillet 2011 relative à la bioéthique.

Sur le Web
- **www.agence-biomedecine.fr** Site de l'Agence de la biomédecine.
- **www.inserm.fr** Site de l'Institut national de la santé et de la recherche médicale.

La Recherche — Complétez votre collection





LE MENSUEL
6,40€ le numéro

Année 2015

- **N°495 janvier 2015**
  Dossier : Les 10 découvertes les plus importantes de l'année.
- **N°496 février 2015**
  Dossier : L'origine de l'univers dévoilée.
- **N°497 mars 2015**
  Dossier : Stress, comment il modifie notre cerveau.
- **N°498 avril 2015**
  Dossier : Intelligence artificielle, jusqu'où iront les réseaux sociaux.
- **N°499 mai 2015**
  Dossier : Kilo, Ampère, Kelvin, Mole Pourquoi les physiciens redéfinissent les unités de mesure.
- **N°500 juin 2015**
  Dossier : Neurosciences. Comment l'empathie naît chez l'Homme.
- **N°501-502 juillet-août 2015**
  NUMÉRO DOUBLE
  Dossier : Les révolutions quantiques.
- **N°503 septembre 2015**
  Dossier : Trois stratégies pour vaincre Parkinson.
- **N°504 octobre 2015**
  Dossier : Terres en vue.
- **N°505 novembre 2015**
  Dossier : Comment le cerveau innove.
- **N°506 décembre 2015**
  Dossier : L'univers recréé en laboratoire.

Année 2016

- **N°507 janvier 2016**
  Dossier : Les 10 découvertes de l'année.
- **N°508 février 2016**
  Dossier : Fusion nucléaire, mythe ou révolution ?
- **N°509 mars 2016**
  Dossier : Pesticides et santé, un dossier accablant.
- **N°510 avril 2016**
  Dossier : Comment le cerveau résiste.
- **N°511 mai 2016**
  Dossier : Champ magnétique, la Terre perd-elle le nord ?
- **N°512 juin 2016**
  Dossier : Mémoire et sommeil, la mécanique des souvenirs enfin décryptée.
- **N°513-514 juillet-août 2016**
  Dossier : Maths, l'étrangeté des grandes dimensions.

LES DOSSIERS DE LA RECHERCHE
6,90€ le numéro





Année 2014
SP08 : L'intelligence artificielle
SP09 : Les nouvelles dimensions du son
SP10 : Piloter la machine par la pensée
SP11 : Internet, pour le meilleur et pour le pire
SP12 : La télévision du futur
SP13 : Comment les robots perçoivent le monde

Année 2015
SP14 : La lumière
SP15 : La conscience
SP16 : Einstein

Année 2016
SP17 : L'Odyssée de l'homme
SP18 : L'intelligence en 20 questions

Et pour conserver votre collection précieusement
➲ **l'écrin 12 numéros**
18€ seulement
(hors frais de port)

Retrouvez l'intégralité des numéros disponibles sur le site www.larecherche.fr

Bon de commande

À retourner sous enveloppe affranchie à LA RECHERCHE
BP 65 - 24 chemin Latéral - 45390 Puiseaux - ✆ 33 (0) 2 38 33 42 89 - nchevallier.s@orange.fr

VPC518

Nom : ______________________ Prénom : ______________________
Adresse : ______________________
Code postal : ______ Ville : ______________ Pays : ______________
Portable : ______________ E-mail : ______________ @ ______________

Pour recevoir des informations sur votre abonnement, merci de nous indiquer votre e-mail.

Oui, je souhaite recevoir dans les 10 jours la commande ci-dessous

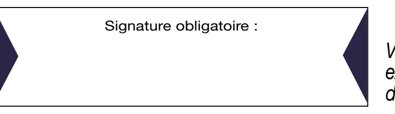
Indiquez ci-dessous les numéros souhaités	Quantité	Prix unitaire	TOTAL
■ LA RECHERCHE	______	6,40 €	______ €
■ LES DOSSIERS DE LA RECHERCHE	______	6,90€	______ €
■ L'écrin LA RECHERCHE 12 numéros	______	18,00 €	______ €
FRAIS DE PORT : France métropolitaine (Étranger, nous contacter) **1,50€** le numéro / + **0,50€** le numéro supplémentaire **6,85€** l'écrin / **8,35€** de 2 à 3 / **9,10€** de 4 à 5 Au-delà de 5 écrins, nous contacter.	______ ______		______ € ______ €
Total de ma commande (Frais de port inclus)			______ €

Je règle aujourd'hui par :

❒ chèque à l'ordre de *SOPHIA PUBLICATIONS* ❒ carte bancaire

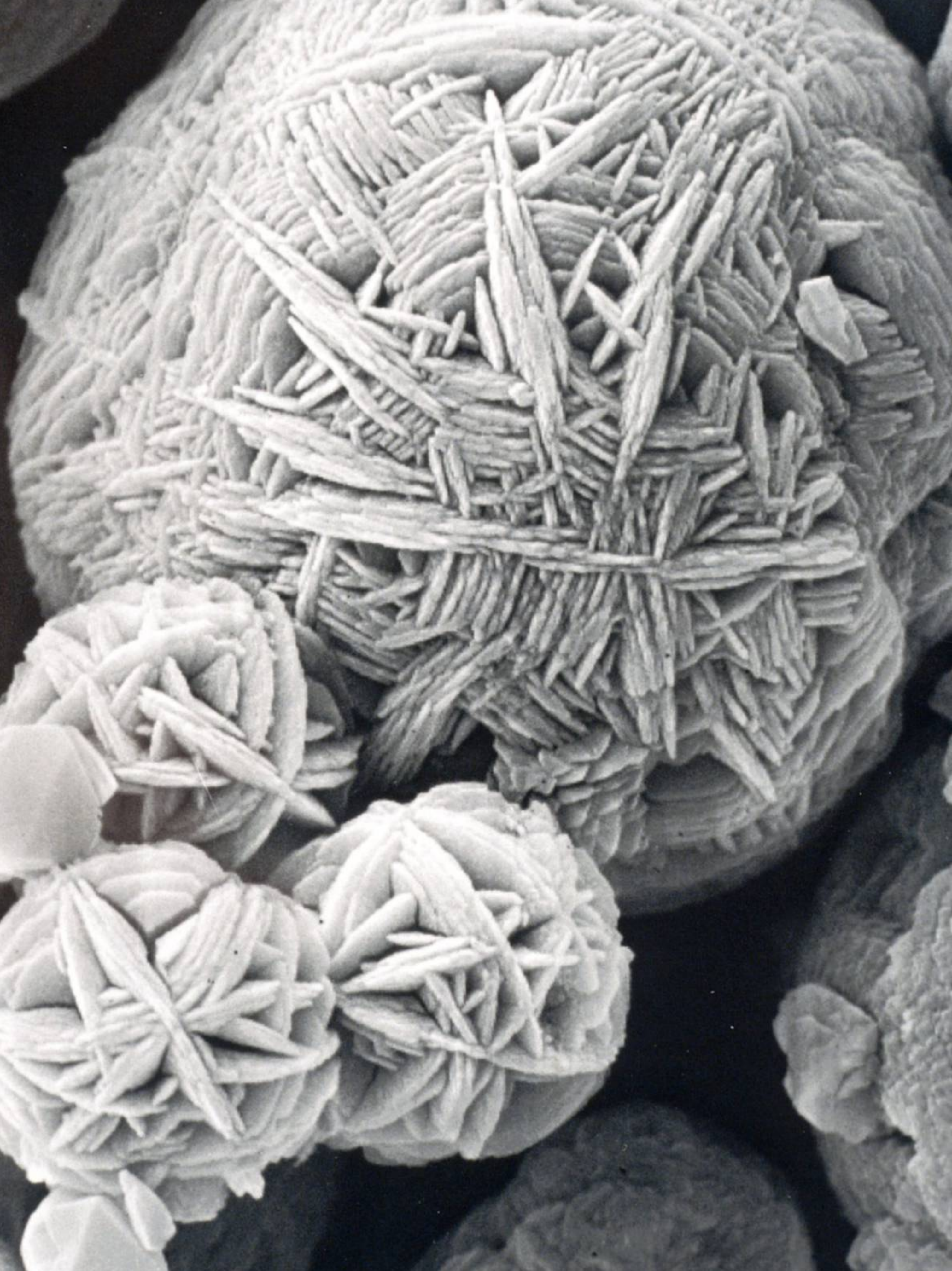
N° ______________

Je note aussi les 3 derniers chiffres du numéro inscrit au dos de ma carte bancaire, au niveau de la signature : ______ Expire fin : ______



Votre commande sera expédiée à réception de votre règlement.

Loi informatique et libertés : vous disposez d'un droit d'accès et de rectification des données vous concernant. Elles pourront être cédées à des organismes extérieurs sauf si vous cochez la case ci-contre ☐





Chimie

Une nouvelle génération de zéolithes

À Caen, des chimistes sont parvenus à synthétiser ces cristaux poreux aux multiples usages par une méthode économique et respectueuse de l'environnement. Une avancée considérable.

Denis Delbecq, journaliste

C'est une fort belle application qui repose sur des années de recherche fondamentale. Le groupe de chimistes conduit par Svetlana Mintova et Valentin Valtchev, au laboratoire catalyse et spectrochimie de Caen, est parvenu à mettre au point une nouvelle méthode de production de cristaux poreux, les zéolithes (1). Sa simplicité, sa performance, son faible impact environnemental marquent d'ores et déjà le secteur. *« C'est un grand pas dans la synthèse à la demande de zéolithes de taille nanométrique, qui promet de nombreuses applications inédites »*, note François-Xavier Coudert, chargé de recherches CNRS à l'Institut de recherche de chimie, à Paris.

Les zéolithes sont des matériaux méconnus. Et pourtant, ces roches dotées de pores minuscules sont très présentes dans notre quotidien. Capables de capturer en surface – on dit adsorber – des composés chimiques (molécules et ions) ou d'abriter des catalyseurs pour doper des réactions, elles sont utilisées pour adoucir l'eau, assécher et purifier les gaz médicaux (oxygène, protoxyde d'azote, etc.). Elles peuvent remplacer le phosphate dans les lessives et prévenir la formation de buée en cas de micro-fuites d'air dans les doubles vitrages. On en trouve aussi dans certaines litières pour chat haut de gamme, où elles piègent les molécules azotées caractéristiques de la mauvaise odeur de l'urine. Plus étonnant, des tonnes de zéolithes naturelles ont été déversées sur le réacteur accidenté de Tchernobyl (1986) et dans l'océan Pacifique à Fukushima (2011), pour piéger le césium radioactif et éviter sa diffusion dans la chaîne alimentaire.

Mais l'application phare des zéolithes concerne le raffinage du pétrole et la pétrochimie. *« La simple distillation du pétrole ne produit que 20 % d'essence,* explique Avelino Corma, dont le groupe à l'Institut de technologie chimique, à Valence en Espagne, a conçu 62 types de zéolithes, la plupart destinées à ces industries. *Mais si on craque le résidu de distillation en présence de zéolithe, on peut en produire 60 % à 80 %. »* Dans ce cas, une zéolithe acide permet de casser les longues molécules carbonées du distillat, à haute •••

Repères

- **De taille nanométrique, les zéolithes fabriquées ont permis d'améliorer le rendement d'une réaction très utilisée par les raffineurs pétroliers.**
- **La méthode de synthèse élaborée permet de maîtriser la composition et la géométrie des zéolithes, donc d'améliorer leur performance.**
- **Mises en solution, ces zéolithes permettent d'envisager de nombreuses applications.**



◄ *Roses des sables de gismondine, une zéolithe naturelle.*

FRANCESCO DI RENZO/CNRS PHOTOTHÈQUE



Chimie

••• température, en molécules plus courtes caractéristique de l'essence. En présence d'hydrogène – ce qu'on appelle l'hydrocraquage –, la zéolithe permet de produire du gazole.

La première zéolithe a été caractérisée par le minéralogiste suédois Axel Cronstedt, en 1756. C'est à lui qu'on doit ce terme – tiré des mots grecs *zeo* (« bouillonner ») et *lithos* (« la pierre »). Et pour cause : en chauffant un échantillon de ce cristal trouvé dans le nord de la Suède, Axel Cronstedt avait observé qu'il se mettait littéralement à bouillir ! En effet, la zéolithe piège dans de minuscules pores de l'eau qui ne demande qu'à s'échapper. Depuis, les zéolithes ont trouvé des débouchés industriels, notamment après que les chimistes ont appris à les synthétiser sans impuretés, en contrôlant soigneusement leur composition et leur géométrie. Les applications sont si nombreuses que chaque année, pas moins de trois millions de tonnes de zéolithes naturelles sont extraites du sol, notamment en Chine, qui assure les deux tiers de la production mondiale.

> **“Aucun traitement n'est nécessaire après l'obtention des cristaux. Il n'y a donc ni calcination coûteuse en énergie ni émission de polluants”**
>
> **Svetlana Mintova,** chercheuse au laboratoire catalyse et spectrochimie de Caen

Une activité minière polluante et dégradant les paysages, puisqu'elle se fait le plus souvent à ciel ouvert.

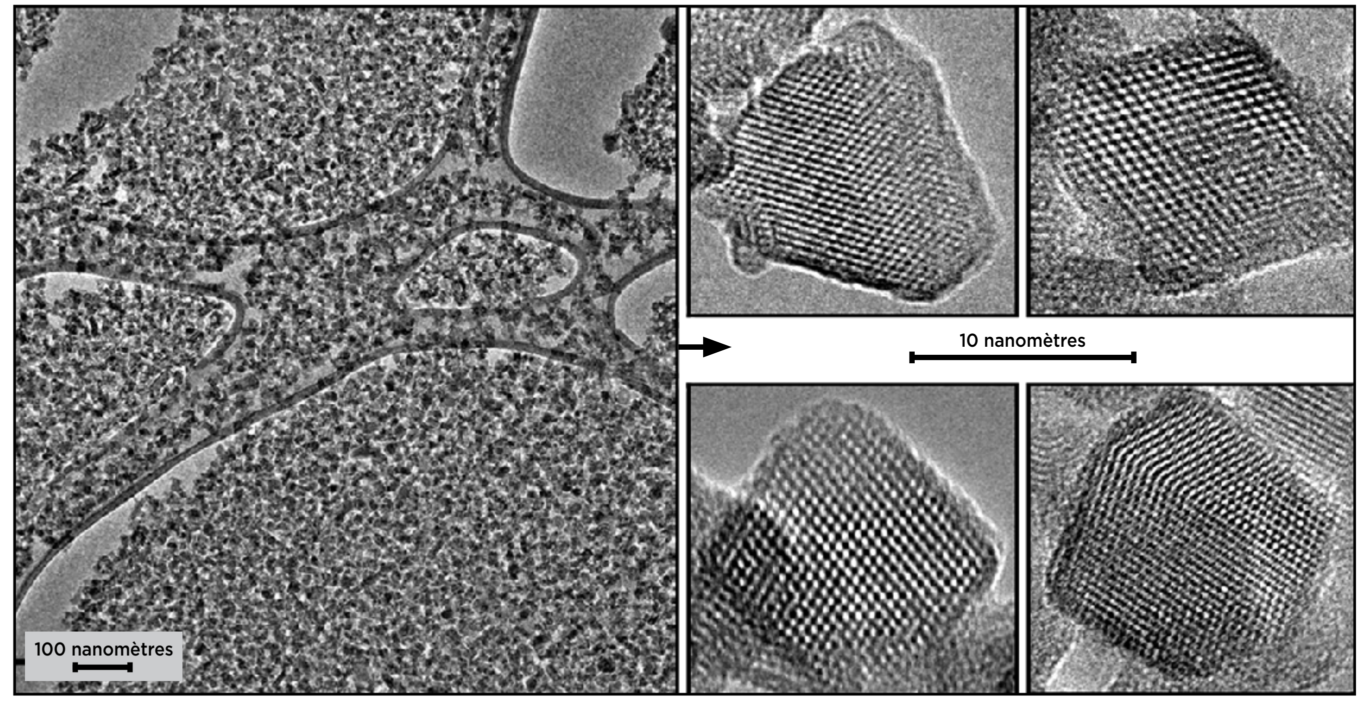
« *D'un point de vue chimique, les zéolithes sont des composés d'aluminium, de silicium et d'oxygène ; ce sont des aluminosilicates,* résume François-Xavier Coudert. *On les prépare par synthèse hydrothermale : on chauffe une solution d'aluminate de sodium, de silicate de sodium et d'un troisième agent, dit "structurant" – le plus souvent organique –, avant de refroidir le mélange. Lors de la cristallisation, l'agent structurant s'insère dans le cristal qui se forme. Ensuite, en chauffant fortement le cristal obtenu, l'agent structurant est dégradé et laisse la place à des pores dans le cristal.* » Ces pores jouent le rôle de cages capables de piéger des composés chimiques ciblés, en fonction de la géométrie du cristal, ou d'héberger des catalyseurs qui vont accélérer des réactions chimiques.

Cette méthode traditionnelle n'est pas sans inconvénients : « *Il faut fabriquer l'agent structurant qui est ensuite détruit par calcination, ce qui consomme des ressources et de l'énergie,* précise François-Xavier Coudert. *Son élimination dégage des substances susceptibles de polluer l'environnement. C'est pour cela que les chimistes sont engagés dans un vrai challenge : produire des zéolithes sans agent structurant organique, et avec un bon rendement de fabrication.* »

UNE « RECETTE » SIMPLE

C'est justement l'objectif qu'a atteint le groupe conduit par Svetlana Mintova et Valentin Valtchev. Leurs travaux publiés ces dernières années – y compris ceux de 2015 récompensés par le prix La Recherche – vont durablement marquer leur discipline (2, 3). C'est pour cela que le duo a été distingué, à deux reprises, par la communauté scientifique : en 2014, il a reçu le prix Cronstedt de la Fédération européenne des associations des zéolithes (Feza) ; puis, en juillet 2016, le Breck Award de l'Association internationale des zéolithes. « *Leur contribution est très importante pour l'ensemble de notre communauté scientifique, car elle apporte une grande connaissance des mécanismes fondamentaux qui président à la formation des zéolithes,* justifie Avelino Corma. *Grâce à eux, nous pourrons produire de nouvelles zéolithes et améliorer les produits actuels. Mes collègues confirment qu'on ne peut progresser dans les applications sans avoir accompli un travail fondamental en amont. Ceux qui financent la recherche publique devraient en tenir compte !* »

« *Les travaux conduits à Caen ces dernières années – et la démonstration en situation réelle dans l'article de 2015 – proposent une méthode très générale qui permet de maîtriser la composition et la géométrie des zéolithes. C'est important car la plupart des autres méthodes ciblent une zéolithe en particulier,* se félicite François-Xavier Coudert, qui appartient au comité scientifique de *La Recherche* et a recommandé les travaux du groupe de Caen. *De plus, la synthèse qu'ils proposent à une échelle nanométrique permet de maximiser la surface d'échange entre la zéolithe et son environnement, et donc d'obtenir des composés beaucoup plus actifs, ce qu'ils ont aussi vérifié ! Même une fois industrialisé, on peut s'attendre à ce que leur procédé conserve une efficacité très élevée.* » De plus, les rendements de fabrication sont de l'ordre de



▲ *Microphotographie de zéolithes (à g.) fabriquées grâce à un procédé à haut rendement et moins polluant que la méthode classique. De plus, on peut contrôler la taille et la géométrie des cristaux : ici, une dizaine de nanomètres, avec une structure hexagonale (zoom à dr.).*

SVETLANA MINTOVA/ENSICAEN - UNIVERSITÉ DE CAEN - CNRS

80 %, soit huit à douze fois plus que les premières générations de nano-zéolithes.
La mise en usine du procédé ne devrait pas être très complexe, tant il est simple. Il pourrait s'apparenter à une recette de cuisine : mélanger deux précurseurs (par exemple de l'aluminate et du silicate de sodium) avec un agent « support » (une solution basique), laisser reposer – ou agiter – quelques heures puis chauffer doucement et laisser refroidir. C'est prêt !

VINGT TYPES DE NANO-ZÉOLITHES

« Nous utilisons par exemple de l'hydroxyde de sodium – la soude – comme agent structurant, indique Svetlana Mintova, du laboratoire catalyse et spectrochimie de Caen. *Il s'agit d'un produit extrêmement bon marché. De plus, aucun traitement n'est nécessaire après l'obtention des cristaux. Il n'y a donc ni calcination coûteuse en énergie ni émission de polluants. C'est un procédé simple, vert et économique à la fois. »* Après le temps de repos, qui peut atteindre une douzaine d'heures, le mélange des deux précurseurs et de la soude est chauffé à une température « douce » – entre 38 °C et 120 °C suivant les besoins, contre 150 °C à 200 °C pour la préparation des zéolithes traditionnelles – dont les cristaux sont de taille micrométrique. *« Il est très important que la croissance des cristaux soit lente, pour qu'ils restent de petite taille,* prévient la chimiste. *Ce chauffage peut se faire au four à micro-ondes en une minute, ou avec des fours conventionnels, pour des durées de cinq heures à deux jours. »* Le choix des précurseurs (silicate, aluminate, etc.), de l'agent structurant (hydroxyde de sodium, de lithium ou de potassium) ainsi que du mode et de la durée de chauffage est dicté par les propriétés recherchées par les chimistes. *« Nous avons déjà pu préparer vingt types de nano-zéolithes »,* assure Svetlana Mintova. Dans l'expérience décrite en 2015, les cristaux obtenus – d'un diamètre de 10 nanomètres (nm) ou 70 nm – présentent des cages d'environ 1,3 nm de diamètre, arrangées en structure hexagonale tridimensionnelle – famille de zéolithes que les spécialistes appellent faujasite. Les chercheurs ont pu confirmer la performance de la substance dans une réaction de déalkylation, bien connue des raffineurs de pétrole, avec un taux de conversion des espèces de la réaction atteignant 98 %, contre 50 % pour une zéolithe couramment utilisée dans •••



Chimie

••• l'industrie. Brevetée, la méthode proposée à Caen ouvre de nouvelles perspectives pour l'utilisation des zéolithes. « *Nous fabriquons à partir d'elles des solutions. Ce sont des suspensions colloïdales de cristaux transparentes et très stables dans le temps. Elles se prêtent notamment à la réalisation de films minces, très utilisés dans les processus de fabrication de semi-conducteurs* », souligne Svetlana Mintova.

DES APPLICATIONS INÉDITES

On peut imaginer aussi incorporer des éléments chimiques dans ces nano-zéolithes pour élaborer des capteurs. « *Imaginez par exemple que l'on enferme de toutes petites quantités de platine dans les pores de ces cristaux,* suggère Avelino Corma. *Dans un environnement qui contient du méthane, ce dernier va être oxydé sous l'effet catalytique du platine, et le cristal va s'échauffer légèrement: en convertissant cette chaleur en potentiel électrique, vous obtenez alors un détecteur capable de déceler une fuite de gaz naturel!* » En jouant sur la géométrie et le diamètre des pores, on peut imaginer toutes sortes de capteurs de mesure de polluants – notamment les oxydes de carbone et d'azote – ou de vapeur d'eau. Avec, là encore, des applications inédites: « *On utilise souvent du "silicagel" en sachet pour protéger des appareils sensibles à l'humidité pendant leur transport, un matériau qui rosit quand il est chargé d'humidité,* explique Svetlana Mintova. *Mais, comme il retrouve sa couleur bleutée quand il s'assèche, le silicagel ne permet pas de tracer une exposition à l'humidité. Avec des zéolithes conçues pour piéger l'eau de manière irréversible, on pourra le savoir!* »

"Les nano-zéolithes pourraient distribuer des médicaments au cœur des cellules"

Avelino Corma, chercheur à l'université de Valence, en Espagne

Les nano-zéolithes intéressent aussi la cosmétique. « *Nous avons des contacts avec Chanel,* confirme Svetlana Mintova. *On pourrait les utiliser comme agent anti-UV dans des écrans solaires, pour remplacer les nanoparticules métalliques qui présentent une certaine toxicité.* » « *On peut aussi imaginer des applications médicales, pour distribuer des médicaments ou des agents de contraste pour l'imagerie au cœur des cellules* », pronostique pour sa part Avelino Corma. Le laboratoire catalyse et spectrochimie de Caen collabore dans ce domaine avec la plateforme de recherches en imagerie biomédicale Cyceron, installée à Caen. « *L'effet des zéolithes a été évalué sur toutes sortes de cellules humaines, comme celles du rein et du cerveau,* raconte Svetlana Mintova. *Nous étions un peu inquiets avant de découvrir le résultat. Mais les nano-zéolithes ne présentent aucune toxicité, elles peuvent donc être utilisées pour des applications médicales.* » Son groupe travaille à la mise au point de composés capables de stimuler l'oxygénation et la réparation cellulaire après une attaque cérébrale. D'autres cristaux sont à l'étude, pour doser la présence, dans le sang, de fibrinogène, une protéine du sang dont l'accumulation peut provoquer des thromboses. D'autres recherches associent les faujasites à du gadolinium – utilisé par l'imagerie à résonance magnétique – ou portent sur des additifs alimentaires: « *Après Tchernobyl et Fukushima, les autorités ont distribué aux enfants des barres chocolatées contenant des zéolithes,* rappelle Svetlana Mintova. *Le but était de piéger et d'éliminer par les voies naturelles les métaux lourds et le césium qui les avaient contaminés. Mais ces zéolithes de taille micrométrique modifient la texture du chocolat. En utilisant des nano-zéolithes, celle-ci ne serait plus altérée.* » Des matériaux façonnables à l'envi, dont les applications n'ont pas fini de nous étonner. ■

(1) H. Awala *et al., Nature Materials, 14,* 447, 2015.
(2) E.-P. Ng *et al., Science, 335,* 70, 2012.
(3) S. Mintova *et al., Science, 283,* 958, 1999.

Pour en savoir plus

■ http://tinyurl.com/youtube-nanoporeux
Les Nanoporeux, documentaire de l'université de Haute-Alsace réalisé par J.-C. Dreyer.

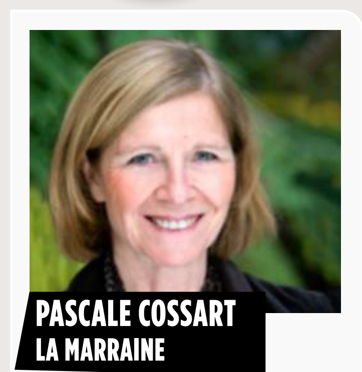
3 RAISONS DE RÉCOMPENSER CETTE PUBLICATION

Selon François-Xavier Coudert, de l'Institut de recherche de chimie, à Paris

- **Cette méthode de synthèse de zéolithes, dont les pores mesurent de un à quelques nanomètres, allie rendement de fabrication très élevé et respect de l'environnement.**
- **Les cristaux obtenus possèdent de remarquables propriétés: stabilité thermique, contrôle précis de la géométrie et performances catalytiques élevées. De même, leur présentation sous forme colloïdale simplifie grandement la réalisation de films minces par dépôt sur des supports.**
- **Cette méthode peut s'appliquer à toutes sortes de zéolithes, avec des compositions chimiques et des propriétés géométriques différentes.**



Prix La Recherche mode d'emploi



PASCALE COSSART
LA MARRAINE

- Secrétaire perpétuelle de l'Académie des sciences
- Professeure de classe exceptionnelle à l'Institut Pasteur
- Chercheuse en microbiologie cellulaire
- Spécialiste de la bactérie pathogène *Listeria monocytogenes*

78 publications présentées en 2016

Réunion du comité scientifique

- Le comité est constitué de 22 chercheurs, représentant toutes les disciplines récompensées.
- Chacun propose trois à six travaux, selon trois critères:
  - constituer une véritable avancée dans leur champ de recherche;
  - impliquer des chercheurs francophones;
  - faire l'objet d'une communication aux pairs en 2015.



22 publications retenues

Délibération du jury

- Le jury se compose des membres de la rédaction de *La Recherche* et d'une marraine.
- Il désigne un lauréat par catégorie et un prix «coup de cœur du jury», choisi parmi les finalistes non récompensés.

11 disciplines récompensées et 1 prix «coup de cœur du jury»

Remise des prix

- Retrouvez les lauréats du prix sur **www.larecherche.fr**

LES MEMBRES DU COMITÉ SCIENTIFIQUE 2016

SERGE ABITEBOUL, directeur de recherche à Inria, professeur à l'ENS Cachan **MARIE-CHRISTINE ANGONIN,** professeure à l'université Pierre-et-Marie-Curie, à Paris, chercheuse au laboratoire Syrte de l'Observatoire de Paris. **FRANÇOIS BERGER,** neuro-oncologue, directeur de Clinatec, CHU Grenoble Alpes. **NICOLAS BERGERON,** professeur à l'université Pierre-et-Marie-Curie, à Paris, et à l'Institut de mathématiques de Jussieu, à Paris. **OLIVIER BOURNEZ,** professeur d'informatique à l'École polytechnique, à Palaiseau. **PIERRE CARTIGNY,** directeur de recherche au CNRS, laboratoire de géochimie des isotopes fiables à l'Institut de physique du globe de Paris. **FRANÇOIS COSTA,** professeur en génie électrique à l'ENS Cachan, laboratoire des systèmes et applications des technologies de l'information et de l'énergie. **FRANÇOIS-XAVIER COUDERT,** chargé de recherche à l'Institut de recherche de chimie, à Paris. **CAROLINE DUBERTRET,** chef du service psychiatrie et addictologie à l'hôpital Louis-Mourier, à Colombes. **JEAN DUPRAT,** responsable de l'équipe «astrophysique du solide», au Centre de sciences nucléaires et de sciences de la matière, à Orsay. **DENIS FAURE,** directeur de recherche au CNRS, responsable de l'équipe «interactions plantes-bactéries», Institut de biologie intégrative de la cellule, à Gif-sur-Yvette. **STÉPHAN FAUVE,** professeur à l'ENS, à Paris, laboratoire de physique statistique de l'Institut de physique. **ÉRIC GILSON,** professeur de biologie cellulaire à la faculté de médecine de Nice, directeur de l'Institut de recherche sur le cancer et le vieillissement, responsable de l'équipe «télomères, sénescence et cancer». **CATHERINE HÄNNI,** directrice de recherche au CNRS, paléo-généticienne au sein de Palgene, plateforme nationale de paléogénétique (CNRS/ENS de Lyon), rattachée au laboratoire d'écologie alpine de l'université Grenoble-Alpes. **JACQUES JAUBERT,** professeur à l'université de Bordeaux, laboratoire de la préhistoire à l'actuel: culture, environnement et anthropologie. **LOÏC LEPINIEC,** directeur de recherche à l'Institut Jean-Pierre Bourgin (Inra/AgroParisTech/CNRS), laboratoire développement et qualité des graines, à Versailles, et coordinateur du LabEx Sciences des plantes de Saclay. **SYLVIE MÉLÉARD,** professeur de probabilités, au Centre de mathématiques appliquées et responsable de l'équipe «modélisation pour l'évolution du vivant», à l'École polytechnique, à Paris. **CATHERINE POSTIC,** directrice de recherche au CNRS, responsable de l'équipe «signalisation de l'insuline et du glucose, et glucotoxicité» à l'Institut Cochin, à Paris. **PASCALE SENELLART,** directrice de recherche au CNRS au Centre de nanosciences et de nanotechnologies, responsable du groupe d'optique des structures semi-conductrices, à Marcoussis. **JACQUI SHYKOFF,** directrice de recherche au CNRS, laboratoire évolution, systématique et évolution de l'université Paris-Sud, à Orsay. **MANUEL THÉRY,** fondateur et directeur du laboratoire de physique du cytosquelette et de la morphogenèse (CytomorphoLab), à l'hôpital Saint-Louis, à Paris. **MICHAËL ZUGARO,** directeur de recherche au CNRS, responsable de l'équipe «rythmes cérébraux et codage neural de la mémoire» du Centre interdisciplinaire de recherche en biologie, à Paris.

MICHELINE PELLETIER



Sciences de l'information

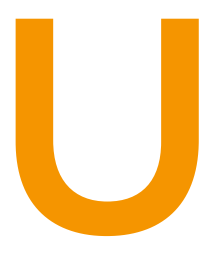
Des robots aux capacités d'adaptation surprenantes

Qu'ils aient une patte en moins, tordue ou endommagée, des robots hexapodes trouvent à chaque fois une nouvelle façon efficace de se déplacer… en une minute.

Pierre Vandeginste, journaliste

Repères

- Face à la panne d'une de ses pattes, le robot à six pattes cherche une nouvelle façon de se déplacer.
- Il se fonde sur un catalogue de milliers de démarches, sélectionnées parmi des millions de solutions testées par simulation numérique.
- Il suffit de huit essais en moyenne pour que le robot trouve une nouvelle démarche.


Un petit robot qui ne baisse pas les bras quand il se casse une patte, c'est la prouesse réalisée par l'équipe de Jean-Baptiste Mouret, à l'Institut des systèmes intelligents et de robotique, à Paris (Isir). Le vaillant robot s'est même retrouvé sur la couverture du magazine *Nature*, qui publia ses travaux en mai 2015 [1].

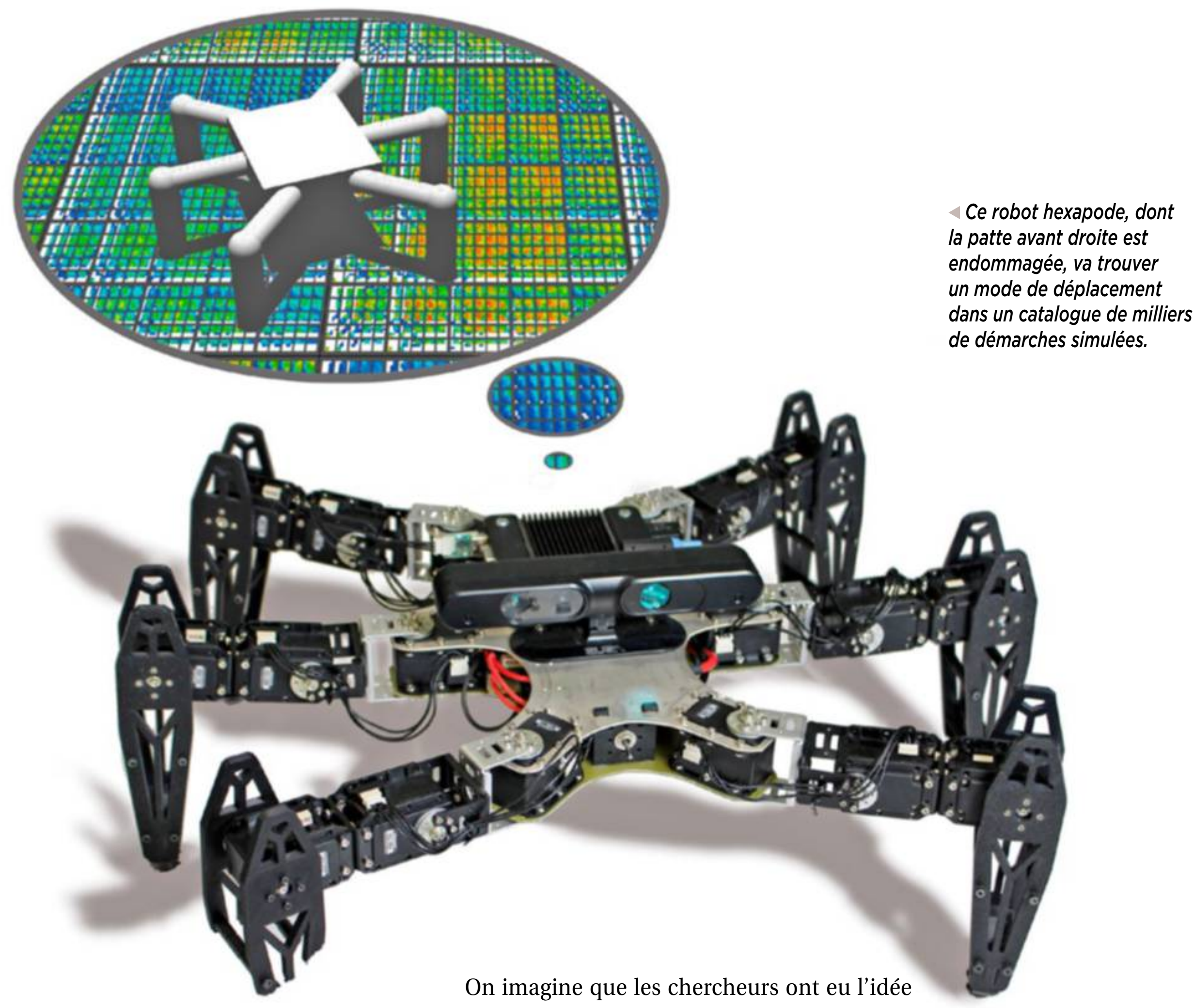
La tolérance aux pannes est un chapitre important de la robotique. Si la science-fiction affiche une préférence pour le robot indestructible, les réalités industrielles obligent à poser la question de la panne ou de l'accident qui diminue soudainement les capacités nominales de la machine. La science-fiction n'hésite pas à mettre en scène l'autoréparation. La recherche, elle, travaille sur des solutions consistant à compenser, à contourner la panne, bref à « faire avec ». C'est ce qu'accomplit le petit robot hexapode de cette équipe parisienne : lorsqu'une de ses six pattes est cassée, il s'adapte à la situation, cherche une façon de marcher. Et il trouve une solution en une minute.

Un cheval peut se déplacer en adoptant diverses « allures », pour reprendre le terme employé en équitation : pas, trot, galop… Diverses manières d'avancer dans un certain ordre ses quatre pattes. On conçoit donc qu'un robot hexapode puisse hésiter entre un nombre très élevé de démarches différentes. Lorsqu'il n'est pas endommagé, notre petit robot hexapode avance d'une démarche qui fait penser à la fourmi. Pour les besoins de l'expérience, les chercheurs l'ont obligé à se débrouiller après lui avoir fait subir divers dommages. Ils l'ont affligé d'une patte cassée, et lui ont même enlevé une ou deux pattes. Dans une vidéo, les roboticiens montrent une situation typique, dans laquelle la patte médiane droite est endommagée. N'étant plus motorisée, cette « patte folle » ne joue plus aucun rôle. Le robot tente de se déplacer en utilisant sa démarche habituelle. C'est pitoyable. Il tourne systématiquement du côté de sa patte estropiée.

ALGORITHME D'ESSAI ET ERREUR

C'est là qu'intervient l'un des algorithmes mis au point par l'équipe parisienne, un « algorithme intelligent d'essai et erreur ». L'hexapode teste successivement des manières différentes de se servir de ses pattes. À chaque essai, les pattes se lèvent, se déplacent vers l'avant, se reposent et poussent vers l'arrière selon une chronologie nouvelle. Chaque test dure cinq secondes, après quoi le robot semble réfléchir pendant trois secondes et passe à l'essai suivant. La première tentative fait tourner le robot en rond, vers la droite, autour de sa patte cassée. Il en va de même pour les deux suivantes. Le quatrième test fait tourner le robot légèrement vers la gauche. Au cinquième test, sa trajectoire est quasi rectiligne, l'hexapode avance presque aussi vite qu'avant la panne.

« *Le robot,* précise Jean-Baptiste Mouret, *est doté d'un capteur qui lui permet de mesurer sa vitesse en ligne droite. Il cherche une démarche*



Ce robot hexapode, dont la patte avant droite est endommagée, va trouver un mode de déplacement dans un catalogue de milliers de démarches simulées.

qui maximise cette vitesse malgré son handicap. Il lui faut en général entre 3 et 16 tentatives, 8 en moyenne, pour trouver une séquence qui lui assure une vitesse jugée acceptable.» L'objectif n'est pas de chercher indéfiniment une illusoire démarche idéale, mais d'en trouver une efficace, dans un temps raisonnable. En l'occurrence, la procédure prend une minute en moyenne.

Comment une telle performance est-elle possible? Parce que l'algorithme d'essai et erreur dont est doté le robot ne teste pas au hasard des séquences de déplacement inventées sur le moment, mais des modes de locomotion tirés d'un catalogue de démarches constitué à l'avance. Ce catalogue est vaste: il comporte environ 13 000 solutions. La redoutable efficacité de ce processus d'adaptation à une situation de panne repose en grande partie sur les caractéristiques de cet étrange catalogue de démarches. Chacune d'elles est décrite par un jeu de 36 paramètres. Ces derniers interviennent dans le calcul des douze fonctions cycliques qui commandent les moteurs actionnant les six pattes et les font lever ou baisser, avancer ou reculer, à un certain moment du cycle.

On imagine que les chercheurs ont eu l'idée de constituer un stock de démarches adaptées à toutes sortes de défaillances: une démarche pour le cas où la patte avant gauche est bloquée en position basse, en position haute, une autre pour le cas où elle est cassée, etc. Il n'en est rien. *«Ce type d'approche est tentant,* indique Jean-Baptiste Mouret, *mais on s'aperçoit rapidement qu'elle débouche sur une combinatoire infernale. Dès lors que l'on s'intéresse à un robot un tant soit peu complexe, le nombre de pannes élémentaires et, surtout, le nombre de combinaisons de pannes élémentaires explosent très vite.»* Ce catalogue de démarches n'est donc en rien un catalogue de réponses à une longue liste de pannes. C'est une collection de 13 000 façons efficaces de se déplacer, en se servant de six pattes valides, de toutes sortes de manières: il contient donc des démarches qui se servent un peu, beaucoup, énormément ou pas du tout de telle ou telle patte. Plus précisément, ces démarches sont organisées dans un tableau à 6 dimensions, soit une par patte. Chaque dimension représentant la durée de la phase pendant laquelle cette patte est posée à terre (et donc supporte le robot). Cinq valeurs sont prévues: 0 %, 25 %, 50 %, 75 % et 100 %. Ainsi, •••



••• l'une des « cases » de ce tableau à 6 dimensions peut correspondre à une démarche au cours de laquelle les deux pattes avant restent posées au sol pendant la moitié du temps, tandis que les médianes le sont pendant 75 % du temps et les postérieures pendant seulement 25 %.
Cinq valeurs possibles pour 6 dimensions, il s'agit donc a priori d'une table comportant 5^6, soit 15 625 positions. Mais certaines d'entre elles correspondant à des situations intenables (par exemple, le robot est instable sur deux pattes), le catalogue du robot contient environ 13 000 démarches utiles pour avancer avec six pattes. Dans le lot de ces démarches, certaines se servent très peu ou pas du tout d'une des pattes, voire de plusieurs. Elles ont donc des chances de se révéler efficaces en cas de panne…

SIMULATION NUMÉRIQUE

Comment ce tableau à 6 dimensions a-t-il été créé ? C'est là qu'intervient un autre algorithme essentiel. Pour fabriquer ce stock de démarches efficaces, on pourrait imaginer de tester physiquement un grand nombre de candidats. Cela aurait limité leur nombre à quelques milliers ou dizaines de milliers. Les chercheurs ont préféré faire appel à la simulation numérique, ce qui leur a permis de tester des dizaines de millions de démarches et d'en choisir 13 000 excellentes.
L'algorithme commence par générer aléatoirement, selon une distribution uniforme, des milliers de démarches. Chacune d'elles est évaluée par simulation à l'aide d'un modèle numérique du robot. On calcule sa performance, c'est-à-dire la vitesse à laquelle cette démarche fait avancer le robot vers l'avant. On détermine alors sa position dans le catalogue, qui dépend de la proportion du temps passé par chaque patte sur le sol. Là, deux cas sont possibles : soit la place dans le tableau de démarches est libre et cette nouvelle « façon de marcher » y est inscrite. Soit il y a déjà un occupant, les performances des deux candidats sont comparées et le meilleur d'entre eux est conservé.
Une fois quelques milliers de démarches inscrites dans la table, l'algorithme passe à sa seconde phase. Celle-ci relève d'une approche évolutionniste. La première collection de démarches sert de population fondatrice pour engendrer une descendance soumise à une « pression de sélection ». D'une manière répétitive, l'algorithme considère une démarche prise au hasard et lui applique une mutation, en d'autres termes, il applique un « bruit » sur ses paramètres. Cela produit une nouvelle démarche semblable mais un peu différente de celle d'origine. Cette démarche « mutée » est alors testée par simulation et son efficacité évaluée. Sa position dans la table est déterminée (ce n'est pas forcément la même que la démarche initiale). Et à nouveau, le candidat est placé dans la table si la place est libre ou si sa performance est supérieure à celle de l'occupant précédent. Ce faisant, les roboticiens ont engendré et comparé quelque 40 millions de démarches, ce qui leur permet de penser que les 13 000 démarches retenues ont de bonnes chances de correspondre à d'excellentes façons de marcher.
Une fois sa patte cassée, le robot endommagé teste un certain nombre de démarches puisées dans ce répertoire. À chaque fois, précisément parce qu'il est détérioré, il y a de grandes chances pour qu'il constate qu'il n'obtient pas un aussi bon résultat que la performance mesurée lors de la simulation numérique, puisqu'elle concernait un robot indemne. L'algorithme prévoit alors de modifier le catalogue pour qu'il reflète ce que le robot vient d'apprendre. Pour cela, un indice de confiance attaché à l'indice de performance de chaque démarche est mis à jour pour tenir compte du fait que la performance mesurée dans le monde réel par le robot blessé est une information plus fiable que la valeur obtenue par simulation numérique d'un robot intègre. C'est pourquoi l'algorithme prévoit, chaque fois qu'il découvre ce que vaut vraiment une démarche, de diminuer en conséquence sa performance enregistrée, tout en augmentant son indice de confiance.
Mieux, cet algorithme propage cette action dans le voisinage de la démarche considérée. Les chercheurs estiment que dès qu'un essai physique permet de constater qu'une démarche est moins efficace pour le robot endommagé que ne l'indi-

3 RAISONS DE RÉCOMPENSER CETTE PUBLICATION

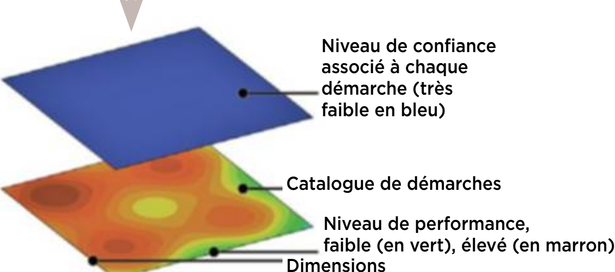
Par Olivier Bournez, de l'École polytechnique, à Palaiseau

- **La solution est originale, immédiatement applicable et elle a un vaste potentiel. Elle devrait permettre de construire des robots autonomes plus résilients, par exemple des robots pour aider des secouristes ou des robots personnels, toujours utiles même avec une pièce cassée.**
- **Les algorithmes proposés constituent une avancée en robotique.**
- **Les expérimentations qui ont permis de valider la démarche sont particulièrement bien conçues et bien menées.**



Simulation avec un robot intact

1 Un algorithme simule les millions de façons de marcher d'un robot intact afin d'identifier environ 13 000 démarches différentes. Celles-ci sont organisées sur un tableau en 6 dimensions (ici en représenté en 2 dimensions). Chaque dimension représente la durée pendant laquelle chaque pied est posé au sol, et chaque démarche est associée à un niveau de confiance. Le niveau de confiance est faible, car il ne s'agit ici que de simulations.



2 Le robot endommagé choisit une démarche prometteuse dans le catalogue et il la teste. Il lui attribue une performance «mesurée» qui se substitue à celle «simulée». Elle est plus faible, car le robot est endommagé, mais elle a un niveau de confiance élevé, car fondé sur un test réel. La performance et le niveau de confiance des démarches proches dans le catalogue sont révisés en fonction de leur proximité avec ce qui est testé.

Robot endommagé

Marche adaptée

3 Le test est répété jusqu'à ce qu'émerge une démarche ayant une performance mesurée correspondant au moins à 90% de la meilleure performance prédite dans le catalogue. C'est cette démarche que le robot endommagé adopte.

quait la performance enregistrée, on peut supposer que cela doit être également le cas, dans une certaine mesure, pour les démarches proches, qui lui ressemblent fort. L'algorithme révise donc à la baisse, graduellement en fonction de la similarité, les performances des démarches voisines, tout en augmentant leur indice de confiance.

RÉVISION INTERACTIVE

Chaque fois qu'il teste et évalue une démarche de remplacement, puis modifie en conséquence le catalogue de démarches, l'algorithme cherche dans le catalogue mis à jour la nouvelle meilleure démarche potentielle. Ainsi, l'information acquise au cours des tests successifs est exploitée au mieux et leur nombre réduit au minimum. *«Ce qui est impressionnant dans ces travaux, c'est l'accélération qu'elle permet de faire dans la recherche d'une solution,* note Auke Ijspeert, qui dirige le laboratoire de biorobotique de l'École polytechnique fédérale de Lausanne, et s'intéresse notamment à la locomotion et à l'apprentissage. *Nous avons travaillé sur la tolérance de panne par essais et erreurs, avec nos robots modulaires et reconfigurables Roombots, mais sans recourir à un catalogue de mouvements: il fallait compter plutôt une demi-heure.»* (2)
L'approche très pragmatique de l'équipe de l'Isir permet au robot d'aller directement au but, de trouver une nouvelle façon d'avancer, sans passer par la case diagnostic. Aussi étonnant que cela paraisse, le robot ne sait pas quelle patte pose problème! *«Cette approche,* estime Auke Ijspeert, *s'oppose à celle publiée en 2006 par une équipe du Creative Machines Lab, de l'université Cornell* [réinstallée en 2015 à l'université Columbia, NDLR], *qui reposait précisément sur la construction automatique d'un modèle du robot endommagé.»* (3) Le robot quadrupède en étoile de cette équipe était en effet capable de maintenir en permanence un modèle de sa propre structure en analysant les relations entre ses actions et sensations. Privé d'une patte, il modélisait sa nouvelle morphologie et partait de là pour inventer une nouvelle démarche. *«À la limite,* remarque Auke Ijspeert, *ces deux approches devraient pouvoir se compléter.»*
«C'est une jolie publication qui offre une approche créative à un problème difficile et important, estime Shimon Whiteson, chercheur en intelligence artificielle à l'université d'Oxford, spécialiste de l'apprentissage, appliqué notamment à la robotique. *À ce stade, c'est seulement une preuve de concept, mais le potentiel est vaste. Les robots sont de plus en plus importants dans l'industrie et le manque de robustesse est un facteur qui ralentit leur diffusion. Je ne serais pas surpris si l'idée derrière cet article était utilisée pour améliorer la robustesse de futurs systèmes robotiques.»*
Pour François Charpillet, directeur de recherche à Inria Nancy et responsable de l'équipe Larsen, que Jean-Baptiste Mouret a rejointe depuis sa publication dans *Nature*, *«jusqu'à présent, la plupart des expériences d'apprentissage sur ce type de robots prenaient des heures, voire des jours. L'intérêt de cette nouvelle approche est donc évident. La plupart des robots pourraient bénéficier de ce type de capacités. Mais on pense surtout aux robots d'intervention, qui travaillent par exemple dans l'urgence sur un site du type Fukushima. Dans ce genre de situation, on veut vraiment que les robots finissent leur mission, même avec une patte cassée!»* ■

(1) A. Cully *et al.*, *Nature*, *521*, 7553, 2015.
(2) A. Spröwitz *et al.*, *Robotics and Autonomous Systems*, *62*, 7, 2014.
(3) J. Bongard *et al.*, *Science*, *314*, 1118, 2006.

Pour en savoir plus

- **tinyurl.com/Mouret-Inria-robots**
Site de Jean-Baptiste Mouret à Inria Nancy (en anglais).
- **www.resibots.eu**
Site du programme de recherche de Jean-Baptiste Mouret (en anglais).
- **tinyurl.com/publi-video-Josh-Bongard**
Cette vidéo issue de la publication de Josh Bongard (*Science*, *314*, 1118, 2006) montre un robot mettant à jour son modèle interne à la suite d'un dommage.



Astrophysique

De mystérieuses vagues autour d'une étoile

Des structures ont été décelées dans le disque de poussières entourant une jeune étoile. Elles pourraient être dues à une planète formée récemment dans le disque.

Julien Bourdet, journaliste

Repères

- **L'instrument Sphere a été conçu pour détecter, avec une netteté sans précédent, des planètes et des disques de poussières autour d'étoiles telles que AU Microscopii.**
- **Dans le disque de celle-ci, les images révèlent d'inédites vagues de poussières en mouvement, peut-être liées à la présence d'une planète.**
- **Une telle découverte permettrait de mieux comprendre la formation des systèmes planétaires.**

Située à 32 années-lumière de la Terre, AU Microscopii pourrait être une jeune étoile ordinaire entourée d'un disque de poussières comme on en connaît de nombreuses autres dans notre Galaxie. Mais les observations d'une équipe internationale d'astronomes révèlent que cet astre âgé de 20 millions d'années est un cas unique. Grâce au nouvel instrument Sphere, installé sur le télescope européen VLT, situé au Chili, les chercheurs ont mis en évidence à l'intérieur du disque des structures en forme de vagues totalement inconnues jusqu'ici (1). Pour expliquer le phénomène, ils avancent un scénario fascinant : ces vagues pourraient être dues à la présence d'une planète géante gazeuse formée récemment dans le disque de matière entourant l'étoile.

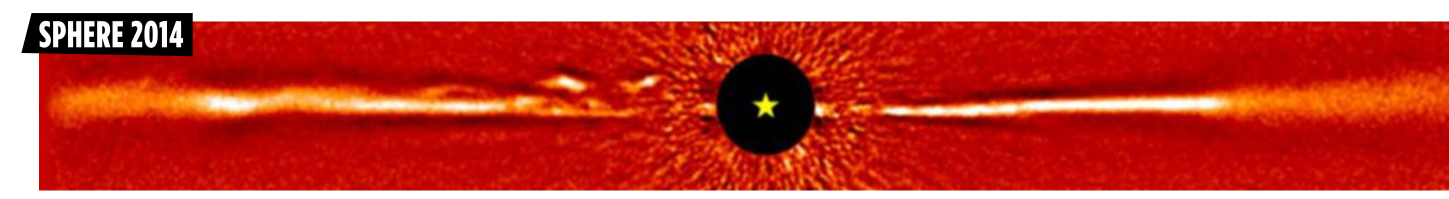
Ce n'est pas la première fois que AU Microscopii se fait tirer le portrait par des astronomes. En 2004, des images dévoilent autour de cette étoile de la constellation du Microscope un immense disque de poussières, vu par la tranche, d'une masse équivalente à celle de la Lune (2). Ce genre de structure intéresse au plus haut point les scientifiques car il pourrait trahir la présence d'un tout jeune système planétaire. *« Les poussières n'ont pu être produites que par des collisions entre des planétésimaux, des objets rocheux de quelques kilomètres, présents encore en grande quantité autour de l'étoile »,* explique Jean-Charles Augereau, de l'Institut de planétologie et d'astrophysique de Grenoble, membre de l'équipe à l'origine de la découverte. Or ces planétésimaux constituent les briques de base à partir desquelles des planètes peuvent se former. Dans le cas de AU Microscopii, vu son jeune âge, le système planétaire – s'il y en a bien un – ne serait pas achevé. Les géantes gazeuses, comme Jupiter dans notre système solaire, seraient déjà formées. Mais les planètes rocheuses comme la Terre seraient encore à un stade embryonnaire et continueraient à grossir en absorbant de la matière du disque.

CINQ NUAGES DE POUSSIÈRES

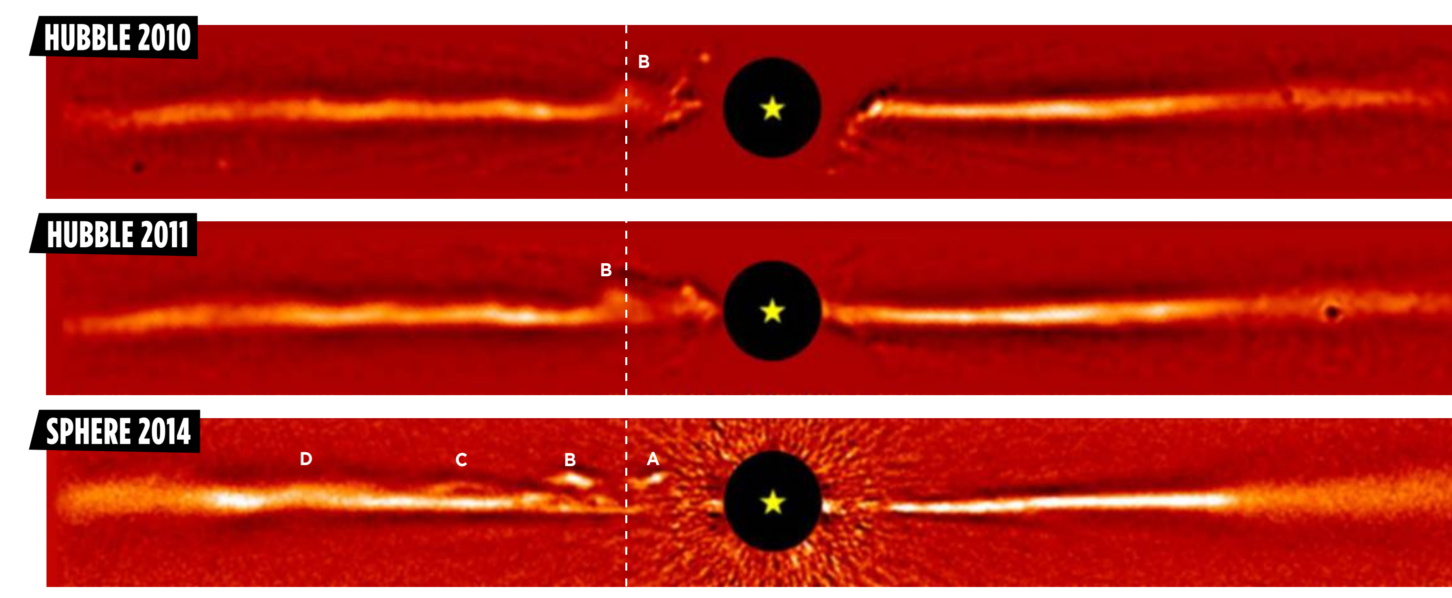
Les astronomes ont d'ailleurs toutes les raisons de penser que des planètes sont bel et bien présentes autour de AU Microscopii. D'abord parce que les observations indiquent que les planétésimaux sont organisés en un anneau situé à environ 35 unités astronomiques (*) de l'étoile, similaire à la ceinture de Kuiper de notre Système solaire. En deçà de cette distance, le disque est quasiment vide de matière. *« Cela pourrait signifier qu'une ou plusieurs planètes ont fait le ménage autour d'elles, repoussant dans le même temps les planétésimaux loin de l'étoile »,* estime Jean-Charles Augereau. Autre indice : les images ont révélé des déformations et des zones plus denses dans le disque. Elles pourraient être le signe de la présence d'une planète en train de perturber, par son champ de gravitation, les petits corps rocheux.

Tous ces troublants indices poussent l'équipe menée par Anthony Boccaletti, du laboratoire

(*) **Une unité astronomique** correspond à la distance Terre-Soleil, soit environ 150 millions de kilomètres.



▲ *En 2014, l'instrument Sphere découvre de nouvelles structures sur un côté (à g.) du disque de l'étoile AU Microscopii, qui semblent former des vagues.*



▲ *L'examen d'images plus anciennes fournies par le télescope Hubble confirme la présence de ces structures (notées A, B, C et D). Ces structures semblent s'être déplacées depuis 2010. C'est notamment le cas de B, dont on observe le mouvement entre 2010 et 2014.*

d'études spatiales et d'instrumentation en astrophysique, à l'Observatoire de Paris, à faire de AU Microscopii l'une des premières cibles de Sphere en août 2014, peu de temps après sa mise en service. Le nouvel instrument du VLT a justement été conçu pour détecter, en les photographiant avec une netteté sans précédent, des planètes et des disques de poussières autour d'autres étoiles que le Soleil (lire ci-dessous).

Les images fournies alors par Sphere sont largement à la hauteur des espérances. Certes, elles ne dévoilent pas de planète, mais elles révèlent étonnamment, sur un côté du disque uniquement, la présence de cinq nuages denses de poussières en forme d'arche ou de vague, s'étalant sur une distance équivalente à celle du Système solaire. Jamais auparavant un tel phénomène n'avait été observé dans le disque de poussières entourant une étoile.

Intrigués par ces structures inédites, les chercheurs consultent des images de la même étoile obtenues en 2010 et en 2011 par le télescope spatial américain Hubble. À l'époque, les clichés n'avaient rien laissé apparaître, la résolution de l'instrument étant moins bonne. Mais, après un traitement numérique adéquat, les mystérieuses arches surgissent également sur les images de Hubble. Mieux : entre les trois prises de vue, leur position a changé. *« Ces structures se déplacent à grande vitesse dans le disque,* note Anthony •••

UN REDOUTABLE CHASSEUR D'EXOPLANÈTES

Pour obtenir l'image d'une exoplanète, Sphere combine trois techniques différentes. La première, l'optique adaptative, permet de corriger les défauts de l'image dus à la turbulence de l'atmosphère terrestre et ainsi d'obtenir des clichés détaillés où l'on peut séparer l'étoile et la planète. La seconde étape consiste à masquer le halo éblouissant de l'étoile à l'aide d'un coronographe. Mais ce n'est pas suffisant : pour supprimer la lumière parasite résiduelle, il faut traiter numériquement les images par une technique dite d'« imagerie différentielle ». Résultat : Sphere peut photographier des planètes jusqu'à un million de fois moins lumineuses que leur étoile, soit des astres de 2 ou 3 fois la masse de Jupiter, situées à 3 ou 4 fois la distance Terre-Soleil de leur étoile. Extrêmement compliquée à mettre en œuvre, la méthode de détection offre cependant d'énormes avantages. Grâce à elle, il devient en effet possible de dévoiler l'intimité des planètes : leur couleur, leur température et les molécules contenues dans leur atmosphère.

ANTHONY BOCCALETTI



••• Boccaletti. *Les plus éloignées sont encore plus rapides que les autres. Trois d'entre elles vont si vite – à près de 10 km/s – qu'elles pourraient bien échapper un jour à l'attraction gravitationnelle de l'étoile. On a donc affaire à quelque chose qui est en train d'être éjecté du système sous nos yeux, ce qui est vraiment très nouveau.* »

L'HYPOTHÈSE DU VENT STELLAIRE

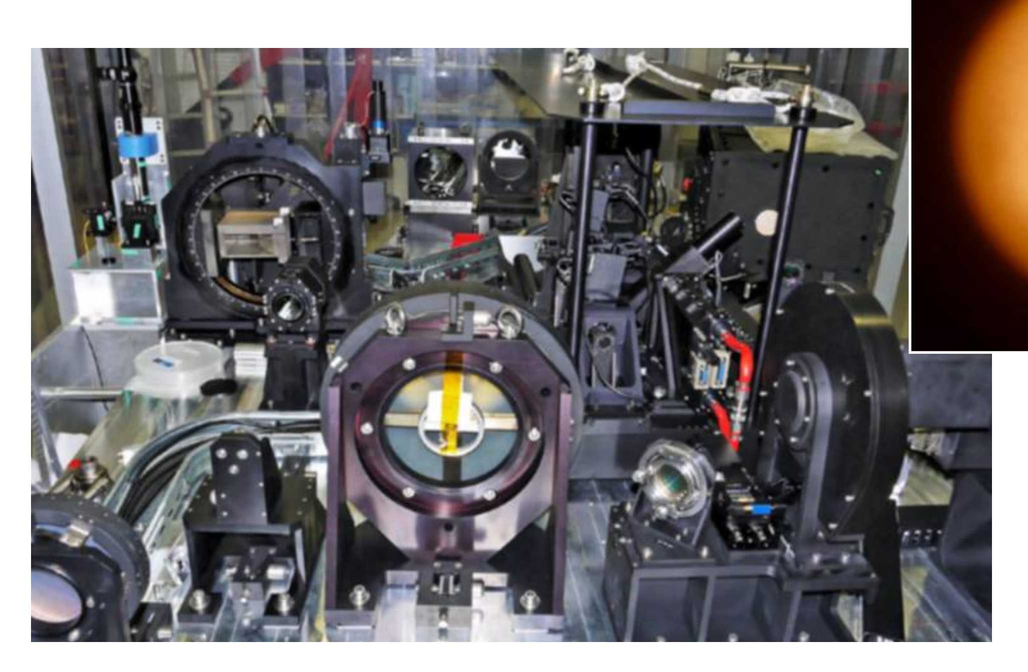
De quoi s'agit-il? Comment ces vagues de poussières sont-elles ainsi propulsées vers l'extérieur? Si les chercheurs ne peuvent aujourd'hui répondre avec certitude à cette question, ils ont toutefois réussi à rejeter certains scénarios. Une première explication envisagée serait celle de planètes géantes perturbant gravitationnellement le disque. « *On sait que les planètes peuvent créer ce qu'on appelle des résonances, en piégeant à certains endroits des planétésimaux,* précise Anthony Boccaletti. *Les cinq vagues correspondraient ainsi à autant de points de résonance qui se déplaceraient à mesure que les planètes tourneraient autour de l'étoile. Mais le problème est que les vitesses qu'on a mesurées sont supérieures à celles qu'on attendrait dans cette situation.* »
Autre idée avancée: celle d'une collision géante entre deux gros – et rares – planétésimaux, qui aurait soudainement produit un énorme nuage de poussières se dissipant à présent dans le disque en créant ces structures ondulées. Mais, là encore, les observations sont incompatibles avec cette hypothèse.
C'est en réalité un autre scénario que favorisent les astronomes. Un scénario qui n'abandonne pas du tout l'idée d'une planète géante, mais qui vient lui ajouter un acteur supplémentaire: le vent de l'étoile. Deux fois moins massive que le Soleil, AU Microscopii est une naine rouge. Or les astronomes savent les étoiles de ce type extrêmement actives, bien plus que notre Soleil. Régulièrement, elles émettent des quantités phénoménales de particules – des protons et des électrons –, qui forment un vent violent, le vent stellaire, se déplaçant à plusieurs centaines de kilomètres par seconde. Mais, si les ondulations étaient mises directement en mouvement par ce vent, on devrait observer ces structures de part et d'autre de l'étoile, celle-ci éjectant de la matière dans toutes les directions. Or ce n'est pas le cas. D'où l'hypothèse avancée par les chercheurs: les vagues seraient en fait le résultat de l'interaction entre les éruptions de l'étoile et une planète. « *Cette hypothétique planète serait sensible aux éjections successives de l'étoile et, elle-même, dans un deuxième temps, créerait une série d'éjections qui se propageraient ensuite dans le disque* », propose Anthony Boccaletti. D'après les astrophysiciens, la matière pourrait être ainsi expulsée à partir de la magnétosphère de la planète – la zone soumise à l'influence de son champ magnétique – ou bien à partir d'un disque de gaz et de poussières en orbite autour de celle-ci.
Ce scénario correspond bien aux observations: si les cinq vagues se déplacent à des vitesses différentes, c'est parce que la planète a bougé sur son orbite entre chacun de ces événements. La formation de ces structures serait d'ailleurs très récente: leur vitesse suggère que la plus ancienne d'entre elles, qui est aussi la plus éloignée de l'étoile, serait apparue il y a vingt ans seulement. Reste que cette théorie ne permet pas de tout expliquer. « *Même en prenant en compte l'effet du vent stellaire, on comprend mal comment les structures ondulées les plus distantes peuvent se déplacer aussi vite. Nous avons encore du pain sur la planche pour décrypter le phénomène* », juge ainsi Gaspard Duchêne, du département d'astronomie de l'université de Californie, qui n'a pas participé à ces travaux.
L'équipe d'Anthony Boccaletti l'a bien compris et elle multiplie les observations de AU Microscopii avec Sphere. Une douzaine est prévue dans les deux ans qui viennent. Déjà, de nouvelles images prises en 2015 et 2016 ont confirmé que les vagues continuent à se déplacer. Et les chercheurs tentent désormais de capter des structures plus proches encore de l'étoile, et donc plus jeunes.



RAISONS DE RÉCOMPENSER CETTE PUBLICATION

Par Marie-Christine Angonin, de l'Observatoire de Paris

- **Il s'agit d'une première scientifique. Jamais auparavant on n'était parvenu à observer en direct le mouvement de nuages denses à l'intérieur d'un disque de poussières entourant une étoile jeune.**
- **Ce résultat, qui est un des premiers obtenus avec l'instrument Sphere installé sur le télescope VLT, démontre l'avancée technologique accomplie par ce dispositif. Grâce à Sphere, les astronomes devraient faire des pas de géant dans la compréhension des mécanismes de formation des systèmes planétaires.**
- **Pour obtenir des images, Sphere combine trois techniques de pointe dont le développement a été porté en grande partie par des laboratoires français.**



◀ *Sphere a été installé en 2014 sur le télescope européen VLT. Cette image qu'il a prise de Titan, le plus gros satellite de Saturne, démontre la précision de son système d'optique adaptative.*

ESO - ESO/J.-L. BEUZIT ET AL./SPHERE CONSORTIUM

En ligne de mire, bien entendu, se joue la découverte de cette planète tant attendue. D'ailleurs, les observations de Sphere ont déjà fourni de précieuses indications sur ses caractéristiques potentielles. « *Si elle existe, cette planète n'est pas très grosse, moins de deux fois la masse de Jupiter, autrement nous l'aurions déjà vue,* indique Anthony Boccaletti. *Nous savons aussi, grâce à la présence de l'anneau de planétésimaux et aux vitesses de déplacement des arches, qu'elle pourrait orbiter à une distance située entre 5 et 35 unités astronomiques de l'étoile.* »

LE RÔLE DE L'IMAGERIE DIRECTE

L'étau se resserre donc autour de cette planète. D'autant que, dans cette quête, Sphere n'est pas le seul instrument sur les rangs. De son côté, le Gemini Planet Imager, installé sur le télescope américain Gemini-Sud, au Chili, a déjà scruté à deux reprises le disque de AU Microscopii et pourrait encore l'observer dans le futur.
Les astronomes ont d'autant plus de raisons d'espérer un jour photographier un tel objet que par le passé d'autres planètes ont été découvertes dans des conditions similaires. C'est le cas notamment de la géante gazeuse atteignant huit fois la masse de Jupiter située autour de l'étoile Bêta Pictoris. Dans le disque de poussières de cet astre, d'étranges déformations mises en évidence en 2006 laissaient suspecter la présence d'une planète, avant que celle-ci soit imagée par le VLT en 2009 (3). L'histoire pourrait ainsi se répéter. Et apporter de précieuses informations aux astronomes qui tentent de mieux comprendre comment les systèmes planétaires, dont le nôtre, naissent et évoluent ensuite. « *Une première grande question concerne la vitesse à laquelle se forment les planètes,* remarque Gaspard Duchêne. *Est-ce un phénomène lent et progressif, ou plutôt rapide et violent ? Une autre question clé concerne la façon dont les planètes géantes peuvent se déplacer dans le système peu de temps après leur formation et perturber ainsi les planétésimaux.* »
Pour répondre à ces questions, la détection, par imagerie directe, de planètes telles celles qui sont attendues autour de AU Microscopii est devenue primordiale car il devient alors possible d'étudier dans un seul et même système, à la fois les propriétés du disque – quantité de poussières, taille et nature des grains – et celles des planètes qui y sont nées – taille, température, composition de l'atmosphère. Or, à ce jour, sur la multitude d'exoplanètes découvertes – près de 2000 –, une poignée d'entre elles seulement a été détectée à l'intérieur d'un disque de poussières. Espérons donc que l'hypothétique planète entourant AU Microscopii viendra bientôt compléter ce tableau de chasse ! ■

(1) A. Boccaletti *et al.*, *Nature*, *526*, 230, 2015.
(2) P. Kalas *et al.*, *Science*, *303*, 1990, 2004.
(3) A.-M. Lagrange *et al.*, *Science*, *329*, 57, 2010.

Pour en savoir plus
■ **tinyurl.com/lagrange-exoplanetes**
Conférence d'Anne-Marie Lagrange sur l'imagerie directe des exoplanètes.

Santé

Pourquoi la fatigue n'est pas qu'une question de sommeil

La fatigue chronique est souvent qualifiée de mal de notre époque. S'il n'existe pas de marqueur physique pour l'expliquer, le rôle de certains neurotransmetteurs et hormones, mais aussi de processus inflammatoires, semble se préciser.

Emma Young, journaliste, **Jean-Clément Nau,** traducteur

Repères

- **La fatigue chronique est plus souvent liée au mode de vie qu'à un manque de sommeil.**
- **La leptine, hormone de la satiété, est susceptible d'accroître la sensation de fatigue.**
- **Les états inflammatoires pourraient également contribuer à la perte d'énergie.**

Cet article est paru dans *New Scientist* le 15 octobre 2016.



Vous vous couchez avant 23 heures, au terme d'une journée bien remplie. Après une nuit de sommeil complète, vous vous réveillez naturellement – mais vous vous sentez… épuisé.

Si vous vous reconnaissez dans ce récit, sachez que vous n'êtes pas un cas isolé. Selon une récente étude menée par des chercheurs de l'université Radboud de Nimègue, aux Pays-Bas, 30 % des 20 000 personnes interrogées se plaignent de fatigue constante auprès de leur médecin. Aux États-Unis, 20 % des personnes consultées disent avoir déjà souffert d'une fatigue si intense qu'elle les a empêchées de mener une vie normale. Et cela a aussi des conséquences financières : les baisses de production dues à la fatigue des salariés coûtent plus de 100 milliards de dollars par an aux employeurs américains.

Il est donc surprenant de constater qu'en dépit de ces données, l'étude de la fatigue en tant que phénomène est pour le moins récente. On considérait naguère que la fatigue diurne n'était pas plus mystérieuse que l'épuisement physique ou que le besoin de dormir. Les centres américains de contrôle et de prévention des maladies estiment que 35 % de la population manque de sommeil aux États-Unis. Si l'on ajoute à cela le fait que le sentiment de fatigue est subjectif (et donc difficile à évaluer) et qu'il est à mi-chemin des études somatiques et psychiques, on comprend mieux pourquoi les chercheurs se sont si peu intéressés au phénomène.

La fatigue accompagne d'innombrables maladies courantes, sans parler de la vieillesse ; une meilleure compréhension de ses causes pourrait donc être synonyme d'amélioration de la qualité de vie pour la quasi-totalité de la population mondiale. Plusieurs chercheurs tentent aujourd'hui de comprendre ses origines et d'élaborer des solutions thérapeutiques. Nous n'en sommes qu'aux prémices, mais quelques pistes commencent à apparaître.

Il y a tout d'abord le fait que la vie quotidienne est toujours plus épuisante. Nous sommes piégés entre les exigences contradictoires de notre travail et de notre famille, sans parler des messages constants de nos smartphones ; rien de surprenant, donc, si beaucoup d'entre nous se sentent épuisés. Et pourtant, il pourrait s'agir là d'une fausse piste. Selon Anna Katharina Schaffner, historienne à l'université du Kent, au Royaume-Uni, voilà bien longtemps que l'humanité se plaint de la fatigue tout en regrettant la relative tranquillité du bon vieux temps. Au fil des siècles, on l'a attribuée à l'alignement des planètes, au manque de piété ou encore à un désir de mortalité inconscient, explique Anna

ANNABELLA BLUESKY/PHANIE

Katharina Schaffner. « *Freud estimait qu'une part très importante de nous-mêmes éprouve un puissant et permanent désir de repos physique et mental* », observe-t-elle.

Le XIXe siècle a vu l'apparition d'un nouveau diagnostic : la neurasthénie. Le médecin américain George M. Beard estimait que cette maladie était provoquée par l'épuisement du système nerveux et qu'elle avait plusieurs conséquences : fatigue physique et mentale, irritabilité, désespoir, dents gâtées, pieds froids, cheveux secs. À l'entendre, la neurasthénie était la conséquence de l'avènement des machines à vapeur et d'autres inventions telles que le télégraphe. L'éducation des femmes était également considérée comme une tâche harassante. L'apparition de l'imprimerie fut quant à elle accusée d'abreuver chacun de quotidiens et de magazines en tous genres. « *Beard craignait que le sujet moderne soit incapable de supporter une telle surcharge sensorielle chronique* », explique Anna Katharina Schaffner.

Si la vie moderne n'est pas en cause, il existe une autre hypothèse : cette fatigue pourrait (au moins en partie) être due à un manque de sommeil. Les chercheurs font toutefois la distinction entre le besoin de sommeil et la fatigue ; s'ils les considèrent très proches, ils relèvent des différences subtiles entre les deux phénomènes. La bonne nouvelle, c'est qu'il existe un moyen relativement simple de déterminer lequel des deux nous épuise : le test itératif de latence à l'endormissement. Ce dernier est utilisé couramment dans les cliniques du sommeil. Il repose sur le principe suivant : si vous vous allongez dans un environnement calme pendant •••

▼ ***Supporter les contraintes de la ville, courir après le temps, rester toujours connecté : autant de raisons de se sentir épuisé.***



••• la journée et que vous vous endormez en quelques minutes, c'est que vous manquez de sommeil ou que vous souffrez d'un potentiel trouble du sommeil. En revanche, si vous ne tombez pas dans les bras de Morphée au bout d'un quart d'heure de repos, mais que vous vous sentez encore épuisé, votre problème est sans doute dû à la fatigue. Mais alors, si elle est différente de l'envie de dormir, qu'est réellement la fatigue? Mary Harrington, neuroscientifique au Smith College, aux États-Unis, compte parmi les rares spécialistes qui cherchent à découvrir une signature biologique de la fatigue. Pour l'heure, les chercheurs n'ont découvert aucun marqueur indépendant concordant avec le sentiment de fatigue exprimé par les sujets, *« mais nous avons quelques candidats »*, précise-t-elle.

Parmi les hypothèses explorées par Mary Harrington, on trouve celle selon laquelle la fatigue diurne proviendrait d'un problème de l'horloge circadienne, qui régule les périodes de vigilance mentale au fil du jour et de la nuit (1). Cette régulation incombe au noyau suprachiasmatique (NSC), qui coordonne les hormones et l'activité cérébrale pour nous doter d'une certaine vivacité d'esprit une fois le jour venu. En temps normal, le NSC déclenche un pic de vigilance au début de la journée, une baisse en début d'après-midi et nous donne envie de dormir le soir.

Selon la neuroscientifique, le temps que vous passez à dormir la nuit n'a que peu d'impact sur ce cycle. Votre niveau de vivacité dépendrait en fait de la qualité des signaux de sortie hormonaux et électriques émis par le NSC. Le noyau règle son horloge à partir du niveau de lumière qui atteint la rétine, de manière à s'adapter au jour solaire. Une lumière trop faible le matin (ou trop importante la nuit) peut dérégler les signaux du NSC, et les deux peuvent induire une léthargie durant la journée. *« Je pense que la perturbation du rythme circadien est assez courante dans notre société, et qu'elle empire avec l'utilisation accrue des sources de lumière la nuit »*, explique Mary Harrington.

Si vous n'avez jamais l'impression d'être complètement réveillé, mais que vous ne vous sentez pas fatigué lorsque vient le temps du coucher, la chercheuse estime que la cause pourrait en être un NSC mal calibré. Ses recommandations: essayer de passer au moins vingt minutes à l'extérieur tous les matins, et éteindre les écrans dès 22 heures afin d'empêcher le NSC de rester bloqué en mode diurne.

LE RÔLE DU SURPOIDS

Mary Harrington estime qu'il existerait un autre moyen de remettre le NSC à zéro: faire de l'exercice. Plusieurs études ont en effet établi un lien entre l'exercice physique et la réduction de la fatigue. *« Les personnes qui souffrent de fatigue ont horreur de l'entendre, mais l'exercice peut vraiment avoir un impact important »*, dit-elle. Ce qui explique peut-être pourquoi les personnes qui commencent à produire un effort physique quotidien déclarent dormir mieux qu'auparavant, alors que certaines études montrent qu'en réalité elles ne dorment pas plus longtemps. La qualité du sommeil pourrait donc se révéler plus importante que sa quantité.

Non seulement le sport réinitialise le NSC, mais il s'attaque aussi aux bourrelets, et il y a de bonnes raisons de penser que la perte de poids peut limiter la fatigue. La graisse alourdit et elle sécrète en outre de la leptine, une hormone qui signale au cerveau que le corps dispose de réserves d'énergie suffisantes. Des études ont déterminé que l'augmentation des niveaux de leptine coïncidait avec une perception accrue de la fatigue. Cette découverte est cohérente d'un point de vue évolutionniste: si vous ne manquez pas de nourriture, vous n'avez pas besoin d'énergie supplémentaire pour aller en chercher. Fait intéressant: parmi les personnes qui jeûnent régulièrement, beaucoup

▸ *Produite par les cellules adipeuses (sphères de couleur jaune), la leptine est l'hormone de la satiété. Elle pourrait contribuer à la sensation de fatigue.*

RAMON ANDRADE 3DCIENCIA/SPL/COSMOS

déclarent se sentir plus énergiques qu'à l'époque où elles ne se privaient pas de nourriture.

Au vu de la fréquence grandissante de l'obésité, la leptine pourrait être l'une des principales sources du sentiment de fatigue chronique. Mais un autre phénomène pourrait être à l'œuvre. Les personnes en surpoids présentent également des niveaux d'inflammation plus importants que la moyenne : une partie de la réponse immunitaire de l'organisme stimule d'autres régions du corps en libérant des protéines, les cytokines, dans le sang. La graisse en stocke de grandes quantités, qui pourraient s'ajouter à celles circulant déjà dans le sang. En plus de stimuler le système nerveux, les cytokines nous donnent le sentiment d'être sans énergie aucune – toute personne ayant déjà souffert d'un rhume peut en témoigner. En 1998, Benjamin Hart, de l'université de Californie à Davis, a avancé que cette sensation était une stratégie évolutive ayant pour but de nous aider à lutter contre les agressions bactériennes ou virales : lorsque l'on a besoin de temps pour se reposer et récupérer, la fatigue est une alliée.

Des études chez l'animal ont permis d'observer ce phénomène en action. Dans le cadre d'une de ces expériences, Mary Harrington a administré à des souris une substance provoquant une inflammation de faible intensité. Elle a alors constaté que les animaux continuaient à bouger et à manger de façon normale, mais qu'ils évitaient la roue de leur cage. Un comportement bien différent de celui des souris saines, qui semblent apprécier la distraction que leur offre la roue. Si l'inflammation de faible intensité prive les souris de leur joie de vivre, la neuroscientifique estime que l'on peut suspecter l'existence d'un effet similaire chez l'humain : *« On peut comparer cette activité au fait de vouloir sortir s'amuser, faire quelque chose qui ne soit pas indispensable à notre survie. »*

L'HYGIÈNE DE VIE EN QUESTION

Robert Dantzer et ses collègues du Centre médical MD Anderson de l'université du Texas, à Houston, ont constaté des modifications dans quelques régions cérébrales clés – des modifications qui pourraient expliquer une absence de motivation. Ils décrivent la manière dont l'inflammation altère l'activité des régions cérébrales liées à la motivation, telles que les réseaux fronto-striataux (impliqués dans les prises de décisions motivées par la récompense) et le cortex insulaire (qui traite la sensation physique de fatigue). Ces modifications expliqueraient certains aspects de la fatigue, tels que le manque de motivation, l'indécision et le simple fait d'être conscient de son état d'épuisement (2).

Et même si vous n'êtes pas malade ou en surpoids, l'inflammation peut être synonyme de fatigue intense. Mode de vie sédentaire, stress, mauvaise alimentation (riche en sucre, pauvre en fruits et légumes) : tous ces facteurs ont été associés à une inflammation chronique de faible intensité. Par ailleurs, selon certaines données préliminaires, la perturbation du rythme circadien peut accroître l'état inflammatoire du cerveau. L'inflammation liée à nos modes de vie pourrait-elle nous aider à comprendre pourquoi tant de personnes se sentent si souvent sans énergie ? Robert Dantzer est catégorique : *« La réponse est oui. »* Il explique par ailleurs que des études épidémiologiques ont mis en évidence un lien entre la fatigue et des niveaux élevés de l'interleukine 6, molécule qui est un marqueur d'inflammation.

Vie sédentaire, stress, mauvaise alimentation : tous ces facteurs ont été associés à une inflammation chronique de faible intensité

Les recherches n'en sont qu'à leur début, mais l'inflammation apparaît de plus en plus comme une voie commune potentielle établissant un lien entre la fatigue et toutes sortes d'éléments – sommeil de mauvaise qualité, inactivité physique, mauvaise alimentation. Si c'est exact, alors nous saurons qu'il est possible de lutter contre la fatigue de manière efficace en modifiant quelque peu notre mode de vie : plus d'exercice, plus de fruits et de légumes riches en polyphénols (resvératrol dans le raisin, curcumine dans le curcuma…), dont certaines études nous disent qu'ils peuvent réduire l'inflammation.

Anna Kuppuswamy, neuroscientifique à l'Institut de neurologie de l'University College de Londres, explique toutefois que l'inflammation n'est pas l'alpha et l'oméga de la fatigue. Cette chercheuse étudie des malades souffrant de fatigue invalidante à la suite d'un accident vasculaire cérébral, période pendant laquelle •••

••• leur cerveau est le siège d'une forte inflammation. « *L'inflammation est sans aucun doute un élément déclencheur de la fatigue. Mais ce qui est frustrant, c'est que l'on constate que la fatigue est toujours présente chez des personnes longtemps après la normalisation de leurs marqueurs d'inflammation* », affirme-t-elle.
Un autre facteur vient brouiller les pistes : les signaux biologiques qui pourraient déclencher une sensation de fatigue écrasante chez certaines personnes ne la déclenchent pas chez d'autres. Anna Kuppuswamy explique que certains sujets parviennent à surmonter le phénomène. Mais cela requiert de la motivation – et le faible niveau de motivation est clairement un aspect important de la fatigue. Des chercheurs se sont donc intéressés au rôle de la dopamine – un neurotransmetteur qui nous pousse à nous faire plaisir. Certaines pathologies, comme la maladie de Parkinson, provoquent une diminution du taux de dopamine ; la dépression et l'apathie qui en résultent peuvent être dévastatrices.
Les faibles taux de dopamine sont également impliqués dans la dépression, car ils réduisent la

Besoin d'un petit remontant ?

Les étagères des pharmacies d'officine débordent de compléments qui prétendent vous aider à « combattre la fatigue » et à « refaire le plein d'énergie ». Mais l'efficacité de ces ingrédients « magiques » a-t-elle seulement été prouvée ?

FER Une chose est sûre : les carences en fer peuvent entraîner la fatigue. L'anémie ferriprive clinique n'est diagnostiquée que chez 3 % des hommes et 8 % des femmes, mais certaines études semblent indiquer que les compléments alimentaires à base de fer pourraient redonner un peu d'énergie au reste de la population. Un groupe de femmes non anémiques souffrant de « grande fatigue » a vu son score de fatigue presque réduit de moitié après une cure de fer de douze semaines. Le groupe placebo a toutefois rapporté une baisse de fatigue de 29 % ; il est donc difficile de mesurer l'effet réel de ces compléments. Selon Jill Waalen, épidémiologiste au Scripps Research Institute, aux États-Unis, il est toutefois crucial de comprendre le rôle important que joue la carence en fer dans la fatigue, même lorsque l'anémie est absente.

VITAMINES B Les vitamines B sont souvent présentées comme le remède miracle aux baisses d'énergie, mais les preuves de leur efficacité sont minces (sauf si vous souffrez de carences). David Kennedy, qui étudie l'impact des substances nutritives sur la fonction cérébrale à l'université de Northumbria, au Royaume-Uni, explique que chez la plupart des gens, les classiques compléments en vitamines B6, B9 ou B12 n'ont aucun effet bénéfique. Il indique toutefois que les chercheurs ne savent pas encore exactement comment les huit vitamines B interagissent dans l'organisme. Les personnes obèses (ou qui s'alimentent mal) pourraient bien souffrir d'une carence, au minimum d'une des vitamines du groupe B. Il estime donc que la prise de compléments en vitamine B peut-être justifiée, mais précise que ces compléments devront comprendre l'ensemble du groupe, et non une simple sélection de quelques-unes.

FLAVONOLS Selon David Kennedy, certaines études indiquent que les flavonols, présents dans le chocolat noir, le vin et le thé, stimuleraient légèrement le flux sanguin cérébral. La consommation de ces aliments pourrait donc améliorer le fonctionnement du cerveau et renforcer la vigilance ; le chercheur précise toutefois que le flux sanguin cérébral est plus stimulé par l'exercice que par les compléments alimentaires.

EAU Dans les discussions en ligne, la déshydratation est souvent pointée du doigt pour expliquer l'épidémie de coups de mou qui frappe une grande partie d'entre nous. Certaines données viennent appuyer cette théorie. Une étude réalisée par l'université du Connecticut, aux États-Unis, a ainsi mis en lumière les effets de la « déshydratation légère » (1,5 % en dessous du volume d'eau normal dans le corps, qui peut selon l'équipe se produire pendant la poursuite d'activités quotidiennes normales). Cette légère déshydratation pourrait entraîner une sensation de fatigue et gêner la concentration, notamment chez les jeunes femmes. Précisons toutefois qu'une baisse de 2 % de notre niveau d'hydratation provoque une sensation de soif. Il suffit donc, dans la plupart des cas, de boire normalement pour éviter la déshydratation, et il est sans doute inutile d'en avaler des litres d'un coup.

HORMONES Une autre théorie fait florès sur Internet : le stress à long terme viderait les glandes surrénales, entraînant fatigue et faiblesse. La fatigue surrénale n'est pas un diagnostic reconnu par la médecine : c'est le chiropracteur et naturopathe James Wilson qui a lancé ce terme en 1998. *« Aucune preuve scientifique ne vient appuyer l'existence de la fatigue surrénale en tant que pathologie médicale authentique »,* affirme Katherine Chubinskaya, endocrinologue à Vancouver, au Canada. L'insuffisance surrénale, elle, existe bel et bien : la corticosurrénale des personnes concernées ne produit pas assez d'hormones. Il s'agit d'une pathologie réelle mais rare. Il est donc peu probable qu'elle soit associée à la fatigue courante.

disponibilité d'un autre neurotransmetteur, la sérotonine. La plupart des personnes souffrant de dépression majeure disent connaître des périodes de fatigue intense, et l'on estime qu'une personne sur cinq est atteinte de dépression au cours de sa vie. Rien d'étonnant, donc, à ce que cet état soit l'un des facteurs communs potentiels de la fatigue.

SÉROTONINE ET DÉPRESSION

Pour Ranjana Mehta, directrice du laboratoire de neuro-ergonomie au Texas A&M Institute for Neuroscience, le fait que la dépression soit si répandue explique en partie pourquoi tant de personnes se sentent à bout de force. Son équipe a récemment montré que le type d'épuisement psychique qui accompagne la dépression peut provoquer une réelle sensation de fatigue physique. Les chercheurs ont constaté que des sujets auxquels ils demandaient de soulever des poids tout en faisant du calcul mental étaient moins endurants (-25 %) que ceux qui étaient uniquement occupés par la musculation. Des études d'imagerie réalisées par la suite ont permis de comprendre pourquoi : l'activité intellectuelle intense réduit celle des régions cérébrales frontales, qui gèrent la direction des mouvements tout en étant impliquées dans la concentration. Lorsque le cerveau est mobilisé, les muscles en pâtissent aussi.
Face à cette multiplication des causes potentielles de la fatigue, de plus en plus de chercheurs décident de s'attaquer au problème. Les instituts américains de la santé (National Institutes of Health) sont en train d'élaborer un programme visant à débusquer les insaisissables marqueurs physiques de la fatigue. Mary Harrington estime qu'il est aujourd'hui nécessaire de mettre au point des modèles animaux de meilleure qualité. Elle juge par ailleurs que les scientifiques doivent produire un effort concerté pour donner à la fatigue une véritable visibilité en médecine. « *J'ai consacré beaucoup de travaux à la question parce que je pense que le problème peut être résolu, mais je dois avouer que je me sens un peu isolée* », reconnaît-elle.
En attendant d'en savoir plus, Mary Harrington nous conseille de ne pas laisser la fatigue nous empêcher de faire ce qui nous plaît. Il est même bon de se forcer coûte que coûte à poursuivre les activités agréables, car une récompense de taille peut déclencher une sécrétion de dopamine dans les régions cérébrales liées à la motivation et à la vivacité d'esprit. Autre possibilité : s'adonner à des activités stressantes. La sécrétion d'adrénaline pourrait nous aider à surmonter notre léthargie. La meilleure option serait d'associer stress et divertissement. Comme le dit Mary Harrington, « *qui se sent fatigué lorsqu'il fait un tour de montagnes russes ?* » ■

(1) D. Bonsall et M. Harrington, *Adv. Neuroimmune Biol., 4,* 265, 2013.
(2) R. Dantzer *et al., Trends Neurosci., 37,* 39, 2014.

À la fin du XIXe siècle, les balbutiements de l'astrophysique s'accompagnent de projets audacieux. La construction d'un observatoire au sommet du mont Blanc en fait partie. Avec ses échecs et ses réussites.

▲ *Pierre Jules César Janssen (1824-1907)*

La brève aventure de l'observatoire du mont Blanc

Marie-Christine de La Souchère, agrégée de physique

L'académicien Pierre Jules César Janssen, directeur de l'observatoire de Meudon, n'était pas un astronome comme les autres. Ce commis voyageur de la science, baroudeur au caractère bien trempé, avait sillonné la planète de nombreuses années durant. En 1857, il parcourait les forêts d'Amérique du Sud pour localiser l'équateur magnétique de la Terre. En 1867, il était au sommet de l'Etna pour annoncer la présence de vapeur d'eau dans l'atmosphère de Mars. En 1870, il s'échappait en ballon de Paris assiégé par les Prussiens et franchissait les lignes ennemies pour aller observer une éclipse en Algérie. Décembre 1874 le conduisit au Japon, pour fixer sur la pellicule le passage de Vénus devant le Soleil, grâce au revolver photographique qu'il venait de concevoir. Et c'est à nouveau le Soleil qui est à l'ordre du jour ce 17 août 1890 quand, déjà âgé et se déplaçant avec difficulté, Janssen fait route vers le mont Blanc, dans une chaise-échelle de son invention, escorté de 22 guides et porteurs. L'objectif de l'expédition ? Déterminer si les enveloppes gazeuses du Soleil renferment de l'oxygène. L'analyse spectrale effectuée à basse altitude a mis en évidence des traces de cet élément mais les rayons solaires traversent l'atmosphère terrestre, qui contient elle-même de l'oxygène. Les spectres ont pu être contaminés par celui-ci. Sans compter les traces de vapeur d'eau. Le mont Blanc surmontant près de la moitié de l'atmosphère terrestre, les effets perturbateurs devraient être limités.

Le 22 août, après de multiples péripéties, la compagnie réduite à Janssen et à douze guides, « ses douze apôtres », atteint le sommet. Comme prévu, les mesures réalisées montrent un affaiblissement marqué des raies spectrales de l'oxygène, qui ne serait donc pas présent dans l'atmosphère solaire, sous sa forme habituelle tout du moins. La pureté et la transparence de l'air, l'absence de lumière diffuse, la raréfaction et la stabilité des masses d'air, l'horizon dégagé, tout suggère à Janssen l'idée d'ériger un observatoire au sommet, ouvert aux scientifiques de toutes nationalités et permettant de tenter des recherches difficiles à basse altitude.

APPROBATION ET FINANCEMENT

Un mois plus tard, Janssen expose son projet devant l'Académie des sciences. L'idée suscite l'enthousiasme par la moisson de données astronomiques, météorologiques et biologiques potentielles, conjuguées à la perspective de montrer la grandeur du pays, après la défaite de 1870. Le projet reçoit l'approbation et le financement de personnalités comme le prince Roland de Bonaparte et le baron Alphonse de Rothschild. Une société est créée dont le président de la République est nommé membre d'honneur. Gustave Eiffel, qui vient d'achever la tour homonyme, est un ami de Janssen. Il se fait fort d'édifier un bâtiment métallique •••

HISTORYMAGES/CHRISTOPHEL

La pureté de l'air et l'absence de lumière diffuse s'avèrent propices à l'observation de la lumière zodiacale

••• pourvu d'une coupole, pour peu que l'on trouve du rocher à moins de 12 mètres de la cime pour asseoir et sceller la construction.

Les sondages débutent l'année suivante, à l'été 1891. Une équipe d'ouvriers et de guides creuse un tunnel et des galeries latérales en contrebas du sommet, et sonde le terrain jusqu'à une profondeur de 15 mètres. En pure perte ! Prudent, Eiffel jette l'éponge. Mais pas Janssen, qui envisage de poser l'édifice directement sur la neige du sommet. Pour tester la résistance de celle-ci, il fait dresser dans la cour de l'observatoire de Meudon une colonne de douze disques de plomb de 30 centimètres de diamètre et de 30 kilos chacun, en haut d'un monticule de 2 mètres de neige tassée pour obtenir une densité identique à celle du mont Blanc. La structure s'enfonce de quelques millimètres à peine et reste en place jusqu'à la fin de l'hiver ! Parallèlement, un édicule provisoire en bois est mis en place en haut du mont Blanc pour cerner d'éventuels mouvements de la calotte neigeuse. Les deux expériences s'étant avérées concluantes, le feu vert est donné. L'édifice définitif est conçu à Meudon, démonté et transporté au sommet. De 10 mètres de long et 5 mètres de large sur 7 mètres de hauteur, formant *« un tout rigide comme un navire »*, il consiste en deux étages et une terrasse dominée par une tourelle d'observation. L'étage inférieur est enfoncé aux trois quarts dans la neige pour une assise plus solide. La forme pyramidale et la disposition fuyante des surfaces offrent moins de prise au vent. L'ensemble repose sur quatre vérins destinés à le remettre d'aplomb le cas échéant.



▼ *En 1895, l'astronome Pierre Jules César Janssen, alors âgé de 71 ans, se rend à son observatoire au sommet du mont Blanc grâce à sa chaise-échelle.*

ADOC-PHOTOS

LE SOLEIL À L'HONNEUR

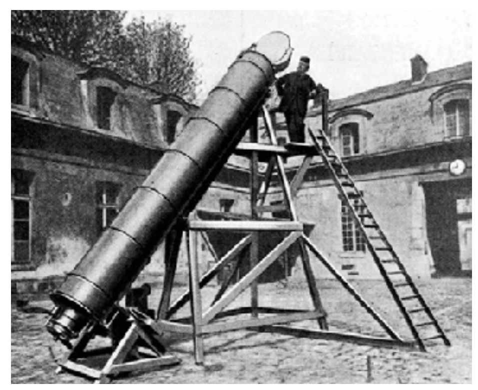
La succursale de l'observatoire de Meudon est inaugurée le 11 septembre 1893. Les instruments d'observation rejoignent le sommet dans les années qui suivent. En 1895 est installé un météorographe enregistreur comportant un baromètre, un hygromètre, un thermomètre (qui enregistrera un record de température de - 45 °C) et un anémomètre, destiné à mesurer la vitesse et la direction du vent. Le mouvement d'horlogerie qui assure sa marche est conçu pour fonctionner huit mois d'affilée sans intervention extérieure. La même année, une grande lunette astronomique de 12 pouces d'ouverture (30 centimètres environ), fleuron de l'observatoire, arrive de Meudon. Des oculaires armés de micromètres et une chambre photographique complètent l'ensemble.

Une fois l'observatoire opérationnel, des campagnes de mesures sont entreprises sous l'égide de Janssen. Le Soleil reste à l'honneur : outre les études spectroscopiques, qui livrent des indications précieuses sur sa composition chimique, les travaux sont axés sur la mesure de la constante solaire, qui caractérise l'intensité du rayonnement solaire à son entrée dans l'atmosphère terrestre. La question taraude les astronomes depuis des décennies car, avant d'arriver au sol, une partie de l'énergie est absorbée par l'atmosphère terrestre et cette absorption est difficile à quantifier. Elle dépend de la teneur en vapeur d'eau, de la pureté et de la transparence du ciel. Elle augmente avec l'épaisseur de la couche d'air traversée, d'où l'intérêt de mesures en haute altitude.

Le jeune astronome russe Alexis Hansky, attaché à l'observatoire de Meudon, en est chargé dès 1896. La constante solaire est évaluée à l'aide d'un actinomètre de Crova, sorte de gros

thermomètre dont la boule est située au sein d'une enceinte sphérique en laiton polie à l'extérieur et noircie en dedans de façon à absorber les rayons du Soleil au lieu de les réfléchir. De 1897 à 1905, Hansky réalise plusieurs séries de mesures avant d'attribuer à la constante solaire la valeur de 3,2 calories par minute et par centimètre carré. Une surface d'un centimètre carré exposée perpendiculairement aux rayons du Soleil, à la limite de l'atmosphère, recevrait donc, par minute, une quantité de chaleur capable d'élever la température d'un gramme d'eau de 3,2 °C (la valeur enregistrée aujourd'hui par satellite est de 1,95 cal/ cm^2/min ou 1 361 W/m^2 dans le système international). Au total, la chaleur dispensée par le Soleil en une année est évaluée à 600 000 fois la consommation de houille et de bois de l'époque. Les mesures calorimétriques ayant le vent en poupe, l'astronome Gaston Millochau accompagne le physicien Charles Féry au sommet, en 1906 et en 1907, pour déterminer la température effective du Soleil. Féry a adapté à l'observation solaire le pyromètre qu'il a mis au point pour mesurer à distance la température des fours industriels. Les mesures réalisées font état d'une température de la photosphère, partie du Soleil habituellement visible à l'œil nu, de l'ordre de 5 400 °C. La pureté de l'air et l'absence complète de lumière diffuse s'avèrent également propices à l'observation de la lumière zodiacale. Cette lueur triangulaire, issue de la diffusion de la lumière solaire par les poussières interplanétaires, peut s'apercevoir les nuits sans lune, à l'ouest, juste après le crépuscule, ou à l'est, juste avant l'aube. En septembre 1904, Hansky observe des détails difficilement visibles dans les conditions habituelles et montre que la lumière zodiacale se raccorde à la couronne solaire. L'astronome russe vient d'ailleurs de mettre à profit la grande lunette de l'observatoire pour effectuer des essais de photographie de cette même couronne solaire. Une gageure car, en dehors •••

▲ L'édifice est constitué de deux étages (dont un enfoncé aux trois quarts dans la neige), une terrasse et une tourelle d'observation.



◄ La lunette astronomique a été montée dans la cour de l'observatoire de Meudon avant d'être transportée au sommet du mont Blanc en 1895.

UN OBSERVATOIRE CONCURRENT À 4358 MÈTRES

Janssen n'est pas le seul à avoir courtisé le mont Blanc. Avant même qu'il ne lance son projet d'observatoire, un concurrent existe déjà, à 450 mètres sous le sommet, ancré dans le roc, au lieu-dit Les Rochers foudroyés, au pied de l'arête des Bosses. Ce chalet-observatoire à vocation pluridisciplinaire qui, en 1898, sera agrandi et déplacé sur un rocher mieux abrité de la neige, a pour fondateur le naturaliste et alpiniste Joseph Vallot, de trente ans le cadet de Janssen. Si dans la vallée on évoque déjà une guerre des observatoires, les relations entre les deux hommes restent courtoises. Janssen nie avoir été guidé par *« l'ambition de dominer de quelques centaines de mètres l'observatoire très bien installé de Monsieur Vallot ».* Et si Vallot, en fin connaisseur de la montagne, ne se prive pas d'émettre des réserves quant à la viabilité du projet de son rival, il met néanmoins son chalet-observatoire à la disposition des travailleurs chargés de sonder les neiges du sommet.

La vocation pluridisciplinaire de l'observatoire Vallot s'exprime à travers des sujets aussi variés que la mesure de la constante solaire, l'écoulement et la température interne des glaciers, la détermination de l'altitude par voie barométrique ou le mal aigu des montagnes. De 1893 à 1917, le compte rendu des travaux réalisés est publié dans les *Annales de l'Observatoire du Mont-Blanc.* Sa parfaite connaissance de la topographie du terrain permet en outre à Vallot de dresser une carte détaillée au 1/20000 du massif. Et de lancer un projet de chemin de fer jusqu'au sommet !

••• des éclipses, la lumière de la photosphère, un million de fois plus intense que celle de la couronne, envahit le champ d'observation. Hansky masque l'image du disque solaire à l'aide d'un cache circulaire en laiton noirci placé au foyer de la lunette. Des filtres lui permettent d'opérer dans le rouge, à des longueurs d'onde où la lumière diffuse du ciel est plus faible. Les temps de pose s'échelonnent de trente secondes à deux minutes. Après traitement des négatifs, l'image obtenue est publiée dans les *Comptes rendus de l'Académie des sciences.* Elle montre des plages lumineuses jusqu'à une distance du tiers du diamètre solaire. Mais le résultat, quoique encourageant, est accueilli avec réserve, Hansky ayant omis de réduire les phénomènes parasites, tels que la lumière réfléchie et diffusée par l'instrument ou l'échauffement de l'air consécutif aux temps de pose élevés.

TÉLÉGRAPHIE ET BIOLOGIE

Si l'astronomie se taille la part du lion, d'autres travaux, notamment de gravimétrie et de télégraphie, sont entrepris à l'observatoire. En 1895, l'astronome Guillaume Bigourdan est dépêché au sommet avec mission d'y mesurer l'intensité de la pesanteur. Combiné à des mesures en divers points du massif du Mont-Blanc, le résultat devrait éclairer sur sa structure interne. L'opération n'aboutit pas car Bigourdan, victime du mal aigu des montagnes, se voit contraint de redescendre. Il remonte l'année suivante, mais cette fois la mesure échoue car l'heure exacte, envoyée par fil télégraphique spécial de l'Observatoire de Paris et retransmise optiquement, ne peut lui parvenir « par suite de nuages interposés ». Plus accoutumé à l'altitude, Hansky reprendra le flambeau et trouvera 9,79472 unités du système international, contre 9,80890 à Meudon.

À la même époque, le professeur Robert Lespieau et son équipe testent les pertes qu'un câble électrique peut éprouver lorsqu'il est placé à nu sur la glace. Même lorsque celle-ci fond en surface, l'isolation s'avère suffisante pour envisager des liaisons télégraphiques. Et les expérimentateurs de *« téléphoner magnétiquement, sans défaillance »* entre le Rocher des Grands Mulets et le sommet, via deux fils de fer galvanisé de trois millimètres de diamètre et de 6 kilomètres chacun, reposant sur le glacier à quelques mètres l'un de l'autre.

La biologie n'est pas oubliée. Le docteur Binot, de l'Institut Pasteur, inaugure une étude bactériologique complète des glaces et des neiges, révélant une flore microbienne d'une richesse insoupçonnée. Et, en juillet 1906, ses collègues Guillemard et Moog poursuivent des investigations sur la formulation sanguine et l'augmentation du nombre de globules rouges en altitude. Mais les travaux ultérieurs semblent compromis. Les jours de l'observatoire, qui s'incline dangereusement et doit être remis d'aplomb à plusieurs reprises, sont comptés. En 1908, une crevasse s'ouvre sous le bâtiment. En 1909, la charpente se disloque sous la pression de la neige. L'observatoire est abandonné. Seule rescapée, la tourelle d'observation, conservée au Musée alpin de Chamonix. Ultime vestige d'une aventure qui aura duré quinze ans. ■

Pour en savoir plus

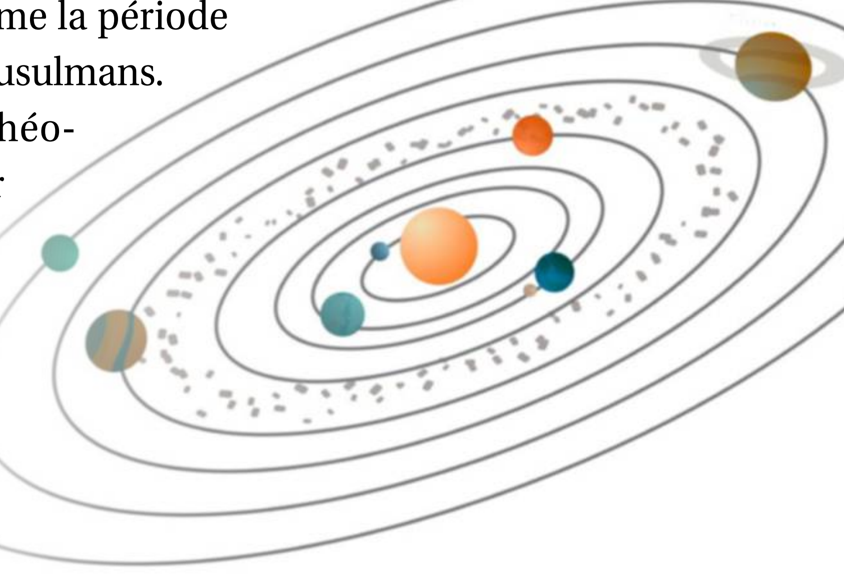
■ Françoise Launay, *Un globe-trotter de la physique céleste : l'astronome Jules Janssen,* Vuibert et l'Observatoire de Paris, 2008.
■ Robert Vivian, *L'épopée Vallot au Mont-Blanc,* Denoël, 1986.
■ **www.tinyurl.com/temperature-du-soleil** G. Millochau, *Recherches sur la température effective du Soleil,* .
■ G. Millochau, *La Grande Lunette de l'Observatoire du Mont-Blanc, La Nature, N° 1724*, 9 juin 1906.

idées

Sciences et religions

Sont-elles compatibles ?

Historiquement, les relations entre sciences et religions ont été conflictuelles, même s'il existe des contre-exemples, comme la période médiévale dans les pays arabo-musulmans. Aujourd'hui, l'opposition aux théories scientifiques provient, pour l'essentiel, des milieux fondamentalistes et se concentre sur des sujets précis (origine de l'Univers, clonage, évolution…). Parallèlement, les initiatives pour encourager le dialogue entre sciences et religions se multiplient. Que faut-il en attendre ?



OKO LAA/SHUTTERSTOCK



Du conflit ouvert au rapprochement ambigu

L'opposition frontale à la science reste vivace dans les milieux religieux fondamentalistes. Mais depuis quelque temps, elle prend une forme plus subtile, particulièrement aux États-Unis : celle de l'appel au dialogue.

Nicolas Chevassus-au-Louis, journaliste

États-Unis, année 2016, le candidat républicain à l'élection présidentielle, Donald Trump, mène sa campagne. Son conseiller chargé des questions d'éducation ? Le neurochirurgien Ben Carson. Celui-ci conteste ouvertement la théorie de l'évolution au nom de ses convictions religieuses : il est membre de l'Église adventiste du septième jour, un courant du protestantisme complaisant à l'égard des thèses créationnistes. Israël, juin 2016, des archéologues rendent publique une découverte importante faite dans la ville portuaire d'Ashkelon, près de Tel Aviv : des tombes, renseignant pour la première fois sur les Philistins, qui vivaient autour de 1000 avant notre ère en Palestine (1). Les scientifiques expliquent qu'ils ont dû mener leurs fouilles dans le plus grand secret, durant trois ans. Pourquoi ? Parce que les ultra-orthodoxes, qui craignent que des sépultures de juifs ne soient dévoilées par les archéologues (ce qui serait pour eux un sacrilège), risquaient de venir interrompre violemment leurs travaux. Espagne, février 2015, le nouveau programme des cours de religion (suivis par plus de la moitié des élèves), imposé par le gouvernement conservateur, cause des remous. Celui-ci stipule en effet que « [le programme vise à apprendre à] *reconnaître avec admiration et s'efforcer de comprendre l'origine divine du cosmos et de distinguer qu'il ne provient pas du chaos et du hasard* ».
On pourrait croire la très laïque France épargnée. Mais les instructions aux enseignants, contenues dans le Livret laïcité publié à la rentrée 2015 par le ministère de l'Éducation nationale, recommandaient *« d'éviter la confrontation ou la comparaison du discours religieux et du savoir scientifique »* (2). Avant de préciser : *« Dans les disciplines scientifiques (SVT, physique-chimie, etc.), il est essentiel de refuser d'établir une supériorité de l'un sur l'autre comme de les mettre à égalité. »* Sciences et religions auraient donc des discours qui ne peuvent être ni hiérarchisés, ni tenus pour comparables. Comprenne qui pourra. L'anecdote en dit en tout cas long sur l'embarras de l'institution scolaire dès qu'il s'agit d'enseigner les sciences, et en particulier la théorie de l'évolution, à des élèves adoptant de plus en plus en souvent un discours hypercritique fondé sur leurs convictions religieuses. Signe de l'importance croissante du problème, le ministère de l'Éducation nationale multiplie les séminaires de formation à l'usage des enseignants pour les préparer à faire face à ces situations déconcertantes.

REGAIN DE TENSION

Tous ces exemples en attestent : le regain de tension est réel entre science et religion. À quoi tient-il ? Le retour en force des monothéismes, qui s'observe à l'échelle mondiale, apporte une partie de la réponse. Montée en puissance des courants fondamentalistes protestants aux États-Unis, prégnance croissante de l'Église orthodoxe dans la vie publique russe, retour massif du religieux dans les pays de culture musulmane, installation des ultraorthodoxes juifs au cœur de la vie politique israélienne : la *« revanche de Dieu »*, que diagnostiquait le politologue Gilles Kepel dès 1991, est bel et bien avérée (3).

On ne peut exclure que le retour du religieux parvienne à interdire dans certains pays les thérapies fondées sur les cellules souches

De ce point de vue, le catholicisme relève du contre-exemple. Historiquement, il a été le fer de lance du conflit entre discours religieux et scientifique (lire p. 84). Mais, depuis une trentaine d'années, il a montré sa volonté de changement. Il ne condamne plus, ni la théorie de l'évolution, ni l'apparition de l'Univers telle que la décrit la théorie du Big Bang (lire p. 82). L'essentiel du conflit entre science et religion se tient aujourd'hui avec d'autres conceptions chrétiennes, en particulier avec les différentes églises fondamentalistes protestantes et, dans une moindre mesure, avec l'islam et le judaïsme.

Le premier sujet d'affrontement est toujours le même : la question des origines, que ce soit celles de l'Univers, celles de la vie ou celles de l'espèce humaine. Sur tous ces points, le savoir scientifique se heurte au discours des religions révélées, pour qui le livre saint (la Bible, le Coran, les Évangiles, etc.) décrit la véritable histoire du monde. Les courants fondamentalistes des différents monothéismes en sont du moins convaincus, ce qui explique leurs attaques récurrentes contre l'enseignement du Big Bang ou celui de la théorie de l'évolution. Ces attaques peuvent prendre des formes diverses : afin de propager ses thèses créationnistes, le prédicateur turc Harun Yahya a ainsi inondé, en 2007, les universités et les écoles d'Europe et des États-Unis d'exemplaires de son *Atlas de la création* (plusieurs milliers auraient été distribués). Dans un autre registre, c'est un véritable musée à la gloire du créationnisme, l'Ark Encounter, qui a ouvert ses portes tout récemment dans l'État américain du Kentucky.



▲ *L'Église catholique a assoupli ses positions vis-à-vis de la science, même si les idées de Benoît XVI (ici à l'observatoire du Vatican en 2009) sont toujours ambiguës.*

OSSERVATORE ROMANO / REUTERS

Le second point de friction porte sur des applications des sciences, plus que sur leurs savoirs. Les monothéismes chrétiens partagent l'idée que la vie ne peut être que d'origine divine. Cette croyance les mène à condamner, entre autres, les recherches portant sur l'embryon, sa fabrication par clonage ou sa manipulation biotechnologique. Comme le rappelait l'ancien pape Benoît XVI à l'occasion d'un congrès tenu au Vatican en novembre 2011, les seules recherches acceptables du point de vue de la morale catholique sont ainsi celles qui portent sur les cellules souches prélevées sur des adultes, non sur des embryons surnuméraires issus de projets de fécondation in vitro.

Certes, ces prises de position, même de responsables religieux de très haut rang, influent peu sur la pratique des chercheurs. Mais on ne peut exclure que le retour du religieux ne devienne un jour si puissant qu'il en parvienne à interdire dans certains pays les thérapies fondées sur les cellules souches. L'histoire récente a d'ailleurs montré que cela était plausible : le président américain George Walker Bush (2001-2009), connu pour ses convictions religieuses conservatrices, avait ainsi mis son veto, en 2006, à un projet de loi visant à lever les limites de financement public pour ce type de recherches. *« Cette loi permettrait de mettre un terme à des vies humaines innocentes dans l'espoir* •••



••• *de trouver des avantages médicaux pour d'autres : elle va au-delà d'une frontière morale que notre société doit respecter, donc j'y ai mis mon veto »,* s'était-il justifié. De l'autre côté du Pacifique, l'Asie reste à l'écart de ce renouveau des conflits entre science et religion. Les religions influentes du continent ne reposent pas sur les mêmes principes que les monothéismes, attachés à la sacralité de la personne humaine créée par Dieu. Pour elles, Dieu équivaut peu ou prou à la nature. Dès lors, l'étude scientifique de la nature, de ses lois et de son fonctionnement, n'y est en rien contradictoire avec le respect des règles religieuses. C'est le cas en Chine, seconde puissance mondiale derrière les États-Unis en termes de nombre de publications scientifiques (là-bas, la religion signifie surtout le respect d'un certain nombre de rites). C'est également le cas en Inde, où ces questions semblent tout aussi étranges – même si certains fondamentalistes hindous essaient de dévaluer le rôle de la science moderne en prétextant qu'elle dérive de leurs plus anciens textes sacrés, les Veda (4).

Plusieurs sensibilités religieuses influentes dans l'Extrême-Orient manifestent donc leur intérêt pour les dernières avancées scientifiques. Le dalaï-lama actuel, par exemple, se passionne pour les neurosciences. Le chef du bouddhisme tibétain a ainsi assisté, en 2005, au congrès de la Société américaine des neurosciences, grande messe de la profession à laquelle participent plus de 20 000 chercheurs du monde entier. Cet exemple est le plus marquant d'une longue liste, qui comprend la participation à plusieurs congrès de biologie du cerveau ou, au mois de septembre dernier, à une journée de dialogue avec des chercheurs de l'université de Strasbourg sur les apports mutuels entre neurosciences et méditation. L'attrait du dalaï-lama se retrouve à plus grande échelle : nombre de moines tibétains ont participé à des protocoles de recherche visant à décrire, grâce aux électroencéphalogrammes et à l'imagerie cérébrale, les bases neuronales de la méditation (5).

“ Un credo religieux prétend exprimer la vérité éternelle et absolument certaine, tandis que la science garde un caractère provisoire ”

Bertrand Russell, philosophe et mathématicien britannique (*Science et Religion,* 1935)

À l'échelle mondiale, qui est celle de l'activité scientifique, le thème de l'opposition entre science et religion n'est donc qu'un phénomène « local ». Il ne concerne que les sociétés dominées par les monothéismes. Dans ces mêmes pays, les relations conflictuelles entre religion et science prennent aussi des formes plus subtiles, d'aucuns diront plus insidieuses : celles d'initiatives prônant un dialogue entre scientifiques et religieux de toutes obédiences. Des exemples ? À la rentrée 2016, l'Université catholique de Lyon a ouvert une chaire « science et religion ». *« L'enseignement de ces questions est difficile en France, du fait de la laïcité de l'État, qui tourne parfois à ce que j'appellerais le laïcisme, et qui fait qu'il n'y a pas, par exemple, de faculté de théologie dans les universités françaises, sauf à Strasbourg. C'est une situation sans*

Le pape François enterre définitivement la hache de guerre

En octobre 2014, le pape François a prononcé devant l'Académie pontificale des sciences un discours consacré aux rapports entre science et religion – le seul à ce jour depuis le début de son pontificat. *« Quand nous lisons le récit de la Création dans la Genèse, nous risquons de prendre Dieu pour un magicien, brandissant sa baguette magique. Mais ce n'est pas ainsi. Dieu a créé les êtres et Il les a laissés se développer selon les lois intérieures qu'Il leur avait données, pour qu'ils se développent et atteignent leur plénitude »,* a-t-il souligné, condamnant ainsi toute lecture littérale de la Bible, telle que la pratiquent les créationnistes. Le pape François a également abordé les deux points habituels de discorde entre discours scientifique et religieux : l'origine de l'Univers et la théorie de l'évolution. Il a déclaré que l'Univers avait débuté par un Big Bang, précisant que ce dernier *« ne contredit pas l'intervention de Dieu, mais il l'exige ».* Sur le second point, il a estimé que *« l'évolution de la nature n'est pas en contradiction avec la notion de Création ; elle suppose la création des êtres qui évoluent en elle. En ce qui concerne l'humanité, il y a un élément nouveau : Dieu lui a donné une autre autonomie, différente de celle de la nature : c'est la liberté. Et il l'a rendue responsable de la Création ».* Ces déclarations s'accordent avec celles de Jean-Paul II, pour qui la théorie de l'évolution était *« plus qu'une hypothèse »,* alors que son successeur Benoît XVI était plus ambigu. Elles semblent marquer la fin du conflit séculaire entre l'Église catholique et les sciences.



▲ *Le prix Templeton, remis ici par John Templeton Jr (à gauche) au mathématicien britannique John Barrow (en 2006), a pour objectif la promotion du dialogue entre science et religion.*

équivalent en Europe », justifie Bertrand Souchard, maître de conférences en philosophie et responsable de la chaire. Dans un récent numéro de la revue *Nature*, Kathryn Pritchard, des services de l'archevêché de Londres, vantait quant à elle les programmes « Scientists in Congregation », finançant la présence durable d'ecclésiastiques dans les laboratoires et de scientifiques dans les offices anglicans (6). De leur côté, les revues savantes fleurissent pour offrir aux auteurs de travaux sur les liens entre sciences et religions un espace où publier leurs réflexions. Citons ainsi la revue *Theology and Science* créée en 2003 (qui se situe dans la mouvance protestante), *European Journal of Science and Theology*, fondé en 2005 (proche de l'église orthodoxe) et encore *Islamic Sciences*, apparu en 2013, qui publie, comme le dit sa charte éditoriale, des travaux *« qui évaluent de manière critique les connaissances contemporaines du point de vue de la tradition de pensée musulmane »*.

DIALOGUE SUBVENTIONNÉ

Le mouvement peut sembler surprenant. Il y a moins d'un siècle, toute idée de rapprochement entre religion et science passait pour totalement incongrue aux yeux des hommes de science comme d'Église. Dans son essai *Science et Religion* publié en 1935, le philosophe et mathématicien britannique Bertrand Russell relevait ainsi l'irréconciliabilité entre *« un credo religieux »* et *« une théorie scientifique »*. Le premier, expliquait-il, *« prétend exprimer la vérité éternelle et absolument certaine »*, tandis que la science *« garde un caractère provisoire : elle s'attend à ce que des modifications de ses théories actuelles deviennent tôt ou tard nécessaires, et se rend compte que sa méthode est logiquement incapable d'arriver à une démonstration complète et définitive »*. Et de conclure sur ce que signifie la recherche de vérité en science : *« La science nous incite à abandonner la recherche de la vérité absolue, et à y substituer ce qu'on peut appeler la vérité "technique", qui [...] est une affaire de degré : une théorie est d'autant plus vraie qu'elle donne naissance à un plus grand nombre d'inventions utiles et de prévisions exactes »*.

Nous sommes aujourd'hui bien loin de Russell, et la thématique du dialogue entre science et religion existe bel et bien. Elle semble trouver son expression privilégiée dans différentes obédiences du protestantisme américain. La Fondation John-Templeton en est un exemple emblématique. L'organisation a été créée en 1987 par un milliardaire américain naturalisé britannique, qui lui a donné son nom. Elle se définit, selon son site internet, comme *« un catalyseur philanthropique des découvertes sur les Grandes Questions* [les majuscules sont dans le texte, NDLR] *relatives à la destinée humaine et aux réalités ultimes »*. Quelques exemples de ces *« Grandes Questions »* : l'Univers a-t-il un but ? Quelle est la nature du temps et de l'espace ? La science rend-elle la croyance en Dieu obsolète ? Soit des interrogations ne relevant pas, tous les courants de l'épistémologie s'accordent sur ce point, des sciences.

Cette confusion n'empêche pas la Fondation Templeton de soutenir, de par le monde, nombre d'initiatives poursuivant son objectif d'accorder science et religion. Elle dispose pour cela d'un capital conséquent : 3,3 milliards de dollars (environ 3 milliards d'euros). Chaque année, l'organisation distribue ainsi près de 100 millions de dollars de subventions (près de 91 millions d'euros). Elle remet aussi de nombreuses récompenses : le prix Templeton, attribué à une personnalité ayant contribué au progrès de la religion, est mieux doté que le Nobel. Elle est également active dans le domaine de l'édition, où elle soutient plus de 200 livres chaque année. En France, elle aide l'université interdisciplinaire de Paris, très critiquée pour son ambiguïté à l'égard du créationnisme (7), le site Sciences & Religions ou la chaire « science et religion » de l'Université catholique de Lyon.

Les États-Unis, première puissance scientifique mondiale, sont ainsi, à travers la fondation Templeton, les principaux instigateurs du thème du dialogue entre science et religion. Il n'est pas certain que l'Europe ait intérêt à faire siennes ces discussions. ■

(1) https://leon-levy.squarespace.com/
(2) http://tinyurl.com/livret-laicite
(3) Gilles Kepel, *La Revanche de Dieu*, Le Seuil, 1991.
(4) M. Nanda, *Frontline, 20*, 78, 2004.
(5) L. Marzetti *et al., Front. Hum. Neurosci., 8*, 832, 2014.
(6) K. Pritchard, *Nature, 537*, 451, 2016.
(7) Cyrille Beaudoin et Olivier Brosseau, *Enquête sur les créationnismes*, Belin, 2013.



Entretien
Yves Gingras

« Science et religion ne parlent pas de la même chose ! »

Dans *L'Impossible Dialogue,* qu'il vient de publier, le sociologue et historien des sciences Yves Gingras explique pourquoi les récents appels au dialogue lui paraissent vains.

Propos recueillis par Nicolas Chevassus-au-Louis

La Recherche **Depuis deux décennies, plusieurs institutions religieuses appellent au dialogue entre scientifiques et religieux, chose que vous considérez comme impossible. On pourrait vous reprocher une certaine intolérance. En quoi est-il gênant que certains cherchent des ponts entre science et religion?**

Yves Gingras Je voudrais d'abord préciser que mes analyses portent sur les rapports entre des institutions. Elles ne remettent pas en question les croyances personnelles des individus et des scientifiques, lesquelles ne m'intéressent nullement car elles sont du domaine privé. En quoi est-ce gênant que l'on cherche à créer des ponts? Parce que les rapports entre les sciences et les religions ne peuvent être qu'asymétriques. Les connaissances sur l'homme, l'Univers, l'évolution… vont des sciences vers les religions et non l'inverse: depuis au moins le XVII[e] siècle, la science cherche à rendre raison du monde par des causes naturelles. Les religions doivent adapter leurs discours – et surtout leurs dogmes – en conséquence, et non l'inverse comme ont tenté de le faire les théologiens chrétiens pendant des siècles. Il est d'ailleurs très significatif que ces appels au « dialogue » viennent d'institutions religieuses et non des scientifiques eux-mêmes. Elles cherchent en fait une nouvelle légitimité dans un monde devenu dominé par les sciences. Il est donc tout à fait légitime et nullement intolérant de se demander pourquoi on exige depuis deux décennies un « dialogue » entre deux mondes qui n'ont rien en commun. D'ailleurs, des événements récents montrent (malheureusement) l'actualité des conflits entre science et religion. Par exemple, de nombreuses sectes protestantes fondamentalistes américaines s'évertuent à refuser (au nom de la liberté de conscience) que l'État fédéral impose (au nom de la santé publique) certains actes médicaux. C'est une des causes de la diminution du taux de couverture vaccinale aux États-Unis, au point que l'on a vu réapparaître des cas de rougeole mortels. Si l'on commence à plier devant des revendications religieuses de plus en plus insistantes au nom de «l'ouverture» et des «accommodements», la poursuite de l'entreprise scientifique de connaissance rationnelle du monde risque de devenir de plus en plus difficile, sinon – dans certains domaines – tout bonnement impossible. Le mot «respect» est sympathique. Mais, comme le disait le philosophe et historien Ernest Renan, *«la critique ne connaît pas le respect; pour elle, il n'y a ni prestige, ni mystère».*

Pourquoi qualifiez-vous d'impossible le dialogue entre science et religion?

Il y a à cela deux raisons de nature différente: l'une est épistémologique et l'autre sociologique. Au plan sociologique, on constate que la science et la religion sont deux institutions sociales qui se disputent la légitimité de décrire le monde et ses origines et ce, en gros, depuis la création des universités au XIII[e] siècle. Sur le plan épistémologique, ces deux institutions ont des objets qui n'ont rien en commun. Cela a été du reste reconnu par les savants et les croyants les plus éclairés. Ainsi le cardinal

DATES CLÉS

1616 Condamnation du livre de Copernic sur le mouvement de la Terre par la Congrégation de l'Index de l'Église catholique.
1633 Condamnation de Galilée, qui défendait des idées coperniciennes, par l'Inquisition. Il terminera sa vie assigné à résidence.
1753 Buffon est contraint de publier dans le tome IV de son *Histoire naturelle* les réfutations de ses thèses par les théologiens de la Sorbonne.
1863 Le Vatican met à l'index *La Vie de Jésus,* d'Ernest Renan, qui propose une lecture historique des évangiles.
1996 Le pape Jean-Paul II affirme que la théorie de l'évolution est *«plus qu'une hypothèse».*

YVES GINGRAS

EST PROFESSEUR **à l'université du Québec, à Montréal, et titulaire de la chaire de recherche du Canada en histoire et sociologie des sciences. Outre *L'Impossible Dialogue* (PUF, 2016), il a publié plusieurs ouvrages dont *Controverses : accords et désaccords en sciences sociales et humaines* (CNRS Éditions, 2014). Il contribue aussi régulièrement à *La Recherche.***

britannique John Henry Newman (1801-1890) écrivait dès le milieu du XIXe siècle que *« la théologie et la science, que ce soit dans leurs conceptions respectives ou dans leur domaine propre, sont dans l'ensemble incapables de communiquer »*. Et Pierre Duhem (1861-1916), physicien, catholique et philosophe des sciences, affirmait lui aussi qu'entre *« deux jugements qui n'ont pas les mêmes termes, qui ne portent pas sur les mêmes objets, il ne saurait y avoir accord ni désaccord »*. Or, pour qu'il y ait vraiment « dialogue », il faut au moins parler de la même chose !

Quelles sont les grandes étapes de ce conflit ?

Il débute pour moi en 1277, quand l'évêque de Paris, Étienne Tempier, condamne 219 propositions d'Aristote qui étaient enseignées à l'époque à la Sorbonne (par exemple, celle où il affirme que le monde est éternel, ce qui est en contradiction avec l'enseignement de l'Église, pour qui le monde a été créé par Dieu). Cette condamnation est une étape clé dans la revendication de la théologie de régenter le savoir, en particulier dans les universités médiévales, où s'institutionnalise un début de pensée scientifique. Les autres étapes symboliquement importantes sont la condamnation de Galilée en 1633 et la publication de *L'Origine des espèces* de Darwin en 1859, qui va susciter une tempête plus vive dans le monde protestant que dans le monde catholique. Dernier conflit, enfin, l'historicisation du récit de la Bible à la lumière de l'archéologie, que pratique par exemple Ernest Renan en 1863. Chacun de ces exemples illustre le même phénomène : une nouvelle science – l'astronomie, la géologie, la biologie, l'archéologie et l'anthropologie et enfin l'histoire des religions – conquiert un peu plus d'autonomie, d'indépendance, à l'égard des discours religieux.

N'y a-t-il jamais de trêve ou d'armistice dans ce conflit ?

Certaines sciences sont bien sûr moins susceptibles d'être confrontées aux dogmes religieux, comme les mathématiques ou la taxonomie, cette science qui classe et ordonne le vivant. Les conflits ne sont donc jamais constants mais plutôt récurrents, en fonction des découvertes qui viennent ou non menacer les dogmes.

En 1996, le pape Jean-Paul II déclare que *« la théorie de l'évolution est plus qu'une hypothèse ».* Comment analysez-vous cette déclaration ?

Cette phrase sibylline ne veut pas dire grand-chose. Que signifie « plus qu'une hypothèse » ? Quand intervient Dieu dans l'évolution humaine pour y insuffler l'âme ? Au stade d'*Homo habilis ? d'Homo erectus ? d'Homo sapiens ?* Où est la rupture qui ferait, d'un coup, d'une créature animale une créature de Dieu ? Il me semble que Jean-Paul II est resté flou parce que le problème théologique que je viens de décrire est insoluble. Le plus important est, pour le pape, de faire savoir que l'Église catholique n'est pas l'ennemie des sciences. C'est •••





••• en fait une sorte de capitulation douce, qui admet enfin que l'Église doit se limiter aux questions éthiques et éviter de se mêler du contenu même des sciences, comme elle l'a fait trop longtemps.

Quand apparaît le thème de l'appel au dialogue entre science et religion?

Ce thème, historiquement sans précédent, émerge dans les années 1980. Cela fait suite à l'annonce par Jean-Paul II, en 1979, de la révision du procès de Galilée. Ce dernier était une épine au pied des papes depuis plus de trois siècles. Ce geste symbolique lançait le message que le temps du «dialogue» était venu. Ces appels au dialogue se traduisent de différentes manières. De nombreux livres commentent (de manière très contestable) la physique quantique en soulignant qu'elle a mis fin à la conception classique de matière et qu'elle ouvre donc la porte à l'idée d'esprit, et plus généralement à des conceptions non matérialistes du monde. Des conférences sont organisées, dans lesquelles des scientifiques, le plus souvent croyants, «dialoguent» avec des hommes d'Église ou des représentants de différentes spiritualités. Enfin, dans le domaine de l'histoire des sciences, on assiste à une révision (avec des auteurs comme John Brooke ou David Lindberg) de la lecture des rapports entre science et religion, qui tend à minimiser l'existence des conflits et à insister plutôt sur les aspects «positifs» des «rencontres» et des «échanges» entre ces deux mondes.

Que reprochez-vous à cette lecture?

De confondre les croyances personnelles religieuses ou spirituelles des savants (qui sont profondes et indéniables chez plusieurs d'entre eux, comme Kepler, Newton, Maxwell et même Galilée) et les institutions religieuses. Le procès de Galilée n'incarne pas un conflit de personnalités mais un rapport de force entre deux institutions. Lorsqu'il est confronté au cardinal Bellarmin, conseiller influent des papes Clément VIII et Paul V, ce ne sont pas deux savants qui dialoguent, comme dans une controverse scientifique classique. Il n'y a aucune symétrie. Ils ne discutent pas de leurs points de vue respectifs. Galilée est un homme seul, face au représentant d'une institution qui dispose d'énormes pouvoirs temporels pouvant aller jusqu'à la mise à mort [le cardinal Bellarmin a aussi mené l'instruction du procès de Giordano Bruno, qui a développé la théorie de l'héliocentrisme, et fut condamné au bûcher pour athéisme et hérésie, NDLR].

L'Église catholique a admis qu'elle doit éviter de se mêler du contenu même des sciences

Cette lecture compréhensive du rapport entre science et religion, répandue dans les pays anglo-saxons, existe-t-elle dans le monde francophone?

Elle est moins présente. Et la rupture entre science et religion est plus ancienne dans le monde francophone. On peut le constater en comparant la fréquence relative de l'usage des termes «science» et «religion» dans la base de données de Google Books, qui contient des millions de livres couvrant la période de 1600 à nos jours. Dans le monde francophone, l'usage du mot «science» dépasse celui de «religion» dès les années 1850. Dans le monde anglophone, ce passage se fait seulement autour des années 1930! Cette tradition historique fait que la France est moins sensible au thème du dialogue entre science et société.

D'où vient cette différence?

Il y a plusieurs éléments d'interprétation. Tout d'abord, le monde francophone, c'est avant tout la France, qui est marquée par le rationalisme au milieu du XVIIIe siècle, puis par la Révolution et, un siècle plus tard, par le positivisme d'Auguste Comte. Au début du XXe siècle, on a aussi les lois sur la laïcité de 1905, et une mise à l'écart encore plus grande de la religion de l'espace public, atypique par rapport à des pays anglo-saxons comme les États-Unis et le Royaume-Uni, qui restent très religieux. Ensuite, le monde francophone est, par sa culture religieuse, majoritairement catholique. Or les appels au dialogue entre science et religion qui ont débuté dans les années 1980 viennent principalement des églises évangéliques, et autres courants du protestantisme, qui sont surtout influents sur le continent américain. Troisième élément d'interprétation: l'apparition du thème du dialogue entre science et religion tient beaucoup à l'influence de la Fondation John-Templeton, du nom de l'homme d'affaires américain et dévot pentecôtiste qui l'a créée en 1987. Cette fondation, dotée d'un capital de près de 3 milliards de dollars, finance généreusement des travaux de recherche, des colloques ou des enseignements universitaires destinés à promouvoir le «dialogue» entre science et religion, ce qui leur donne une grande visibilité dans l'espace public.

Comment analysez-vous l'action de cette fondation?

Elle relève d'une stratégie d'influence, visant à faire du dialogue entre science et religion une question légitime dans le débat public et académique. La Fondation vise à s'associer à des savants respectés et croyants, comme le biologiste Francis Collins, qui a dirigé le programme de séquençage du génome humain dans les années 1990, et qui, une fois la renommée atteinte, a fait son coming out religieux en publiant *De la génétique à Dieu* (Presses de la Renaissance, 2010). Elle cible aussi des institutions scientifiques renommées, comme l'American Association for the Advancement of Science (qui édite la revue *Science)*. Depuis 1996, celle-ci anime un programme consacré au «dialogue entre science, éthique et religion» financé par la fondation Templeton. Je note aussi que les historiens des sciences dont je critique la vision irénique du rapport entre science et religion ont tous été primés ou financés par la Fondation. Cette dernière étend maintenant son action en direction des religions juive et musulmane. ■

Pour en savoir plus

■ Guillaume Lecointre, *Les Sciences face au créationnisme*, Quae, 2011.



Sciences médiévales en terres d'islam

Le Moyen Âge marque un âge d'or pour la science dans les pays arabo-musulmans. Les nouvelles idées, qui foisonnent sous le regard bienveillant des autorités politiques et religieuses, contribueront à la Renaissance européenne.

Inès Safi, physicienne

Avec de plus en plus de découvertes et de surprises, tout continue à être réévalué à propos des sciences arabo-islamiques: calendrier, étendue géographique, motivations, développement. On ne cesse d'explorer les modalités complexes selon lesquelles les héritages grec, indien et sassanide, ainsi que la science arabe, ont été transmis à l'Europe. En la matière, le travail de l'historien des sciences Abdelhamid Sabra (1924-2013) a joué un rôle pionnier. Son article « L'appropriation et la naturalisation ultérieure de la science grecque dans l'islam médiéval » (1), publié en 1987, fut une critique notoire de la thèse du physicien Pierre Duhem (1861-1916), selon laquelle le monde arabo-musulman ne fut que le réceptacle intermédiaire de la science grecque. À sa suite, ce sont désormais des universitaires tels que Otto Neugebauer, Noel Swerdlow, George Saliba, Dimitri Gutas, F. Jamil Ragep, Roshdi Rashed ou Ahmed Djebbar, qui poursuivent l'élaboration d'un nouveau paradigme de l'histoire des sciences.

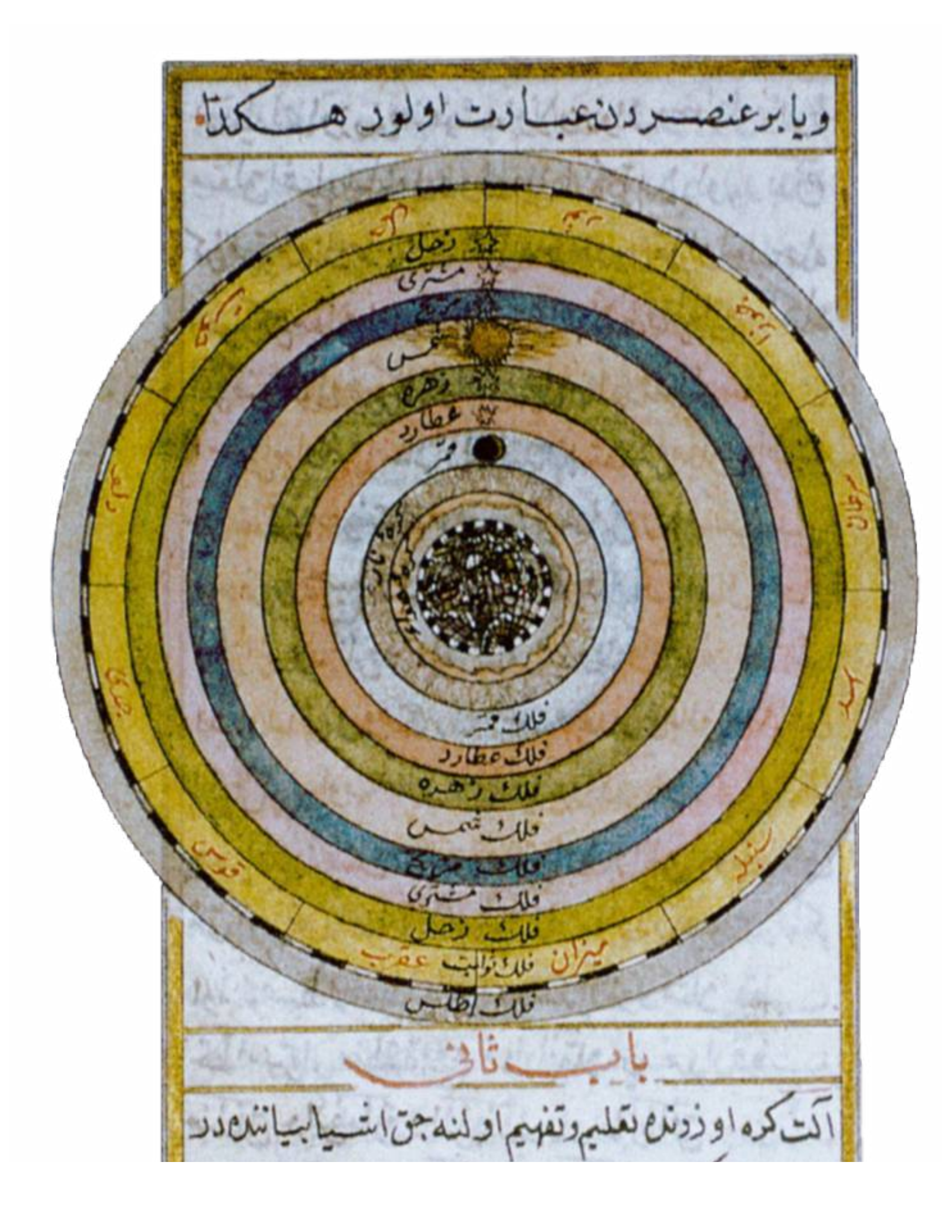
Ces chercheurs montrent la fragilité des thèses orientalistes remontant à la fin du XIXe siècle et imprégnant encore le milieu académique. Ces dernières sont héritées, en particulier, du philosophe et historien Ernest Renan (1823-1892). Celui-ci affirme, lors de sa conférence « L'islamisme et la science » à la Sorbonne, en 1883, que l'ensemble philosophico-scientifique arabe n'a d'arabe que la langue, et serait *« en réalité gréco-sassanide »*. Persécutée systématiquement par l'islam, la pensée rationnelle a fini par être anéantie *« passé l'an 1200 à peu près »*. À partir de cette période, par exemple, *« l'astronomie n'est tolérée que pour la partie qui sert à déterminer la direction de la prière »*.

UNE PHILOSOPHIE « LIBÉRÉE »

Malgré son érudition et son rayonnement, Ignaz Goldziher (1850-1921), l'un des pères de l'orientalisme scientifique européen, a aussi contribué à imposer la thèse selon laquelle l'« ancienne orthodoxie » religieuse, qu'il peine à définir, a été hostile aux sciences grecques (2). Un consensus s'est ainsi établi: c'est malgré l'islam que les sciences « anciennes » auraient été traduites, et pour les plus indulgents, développées. L'intérêt pour les sciences, de courte durée, se serait éteint sous la critique fatale de la philosophie, notamment due au théologien Al-Ghazâlî (1058-1111).

Or, les nouveaux travaux écrivent une histoire bien différente des traductions gréco-arabes, du développement des sciences, et de leur transmission à l'Occident. George Saliba évoque la *« sophistication avec laquelle fut reçue et traduite la tradition grecque »* (3). Abdelhamid Sabra considère pour sa part qu'en termes d'intensité, de portée, de concentration et de concrétisation, *« ce mouvement n'a pas eu d'équivalent, ni au Moyen-Orient ni dans le monde »* (4). Quant à Dimitri Gutas, il estime que ce mouvement *« constitua une véritable ère nouvelle dans l'histoire de l'humanité, ayant une signification et une valeur égales à celles de la Renaissance italienne »* (5). Selon lui, Bagdad, nouvelle capitale, est le lieu de son apogée car elle s'éloigne de l'influence du christianisme byzantin, hostile à l'héritage grec païen exclu de l'enseignement depuis le IVe siècle. Le philosophe Al-Fârâbî (vers 872-vers 950) écrit: *« La philosophie a été finalement libérée en atteignant les terres d'islam. »* En notant que toutes les ethnies, confessions et classes sociales ont participé aux « réalisations spectaculaires »

Selon Abdelhamid Sabra, les critiques théologiques touchaient *« des branches occultes de l'hellénisme traditionnel, telles la magie et l'astrologie »*



◀ *Miniature du XVIIIe siècle représentant le système planétaire et le zodiaque tels que les conçoivent les Ottomans.*

ROLAND AND SABRINA MICHAUD / AKG-IMAGES

des traductions, Gutas et Sabra critiquent Goldziher sur la prétendue hostilité de l'islam, prenant comme contre-exemple le philosophe hellénisant musulman et arabe Al-Kindî (801-873). *« Même si les acteurs de la traduction n'étaient pas musulmans, leurs activités étaient positivement et généreusement soutenues par les établissements de gouvernance "musulmans" – la cour califale et les individus qui y sont associés »,* explique ainsi Abdelhamid Sabra.

Sabra rappelle aussi que les critiques théologiques, par ailleurs complexes et liées aux diverses crises historiques, se sont dirigées essentiellement à l'encontre *« des branches occultes de l'hellénisme traditionnel, telles la magie et l'astrologie ».* L'historien ajoute : *« La tradition grecque avait besoin de déterminer la position des planètes afin de prédire son influence sur le monde du changement dans la région sublunaire, alors que l'astronomie islamique s'est restreinte à la description du comportement des planètes, avec la précision la plus élevée qu'elle pouvait assurer, et s'est réservée de questionner l'influence des planètes sur la région sublunaire et le comportement humain en particulier. C'est dans cet environnement que la nouvelle discipline du* 'ilm al'haya *(« science de l'astronomie ») prit naissance, et n'avait évidemment en tant que telle aucun équivalent grec. »*

Avec la critique de l'astrologie, et le *'ilm al'haya* qui en a émergé, on peut dire, en termes actuels, qu'il s'agit d'une modernisation des sciences, libérées par des religieux de leur visée occulte. Ajoutons que des besoins et orientations théologiques ont engendré de nouvelles branches ou même des révolutions scientifiques. Certains « traditionalistes » ont très tôt contesté le modèle grec d'un monde clos, voire le modèle géocentrique, et ont évoqué plusieurs soleils et mondes habités. C'est le cas de la cosmologie de Fakhr al-Din al-Razi (1149-1209), que l'on retrouve chez l'arabisant Giordano Bruno (ce qui lui a valu le bûcher en 1600 à Rome). Le legs ancien a ainsi continué, grâce à la pensée scientifique de la culture arabo-islamique qui l'a reçu, *« à être progressivement défini et perfectionné en accord avec les critères de précision et de consistance, en évolution constante, que cette culture s'imposait à elle-même »,* jusqu'à aboutir à des *« résultats révolutionnaires »,* explique George Saliba. L'historien rappelle aussi que les scientifiques illustres étaient très souvent des théologiens, tel le grand astronome et mathématicien Nasir al-Din al-Tusi (1201-1274), qui a fondé l'observatoire de Maragha (dans le nord-ouest de l'Iran actuel).

L'ASTRONOMIE AU PREMIER PLAN

La période qui succède à Al-Ghazâlî est considérée par certains historiens des sciences comme le véritable « âge d'or » de la science arabo-islamique : c'est *« la plus féconde. Dans le domaine de l'astronomie, en particulier, elle est inégalée »,* écrit George Saliba. Cette astronomie « moderne » aurait été libérée du joug des modèles d'Aristote et de Ptolémée grâce à la critique envers la philosophie menée par Al-Ghazâlî. Selon George Saliba – qui cite Neugebauer et Swerdlow –, Copernic *« est le maillon final de cette chaîne »,* non pas le point de départ d'une nouvelle astronomie. En effet, celui-ci reproduit exactement les modèles d'Ibn al-Shâtir •••



(1304-1375), le lemme de 'Urdî (1200-1266) – qu'il a mal digéré – et le théorème de Nasir al-Din al-Tusi – avec les mêmes lettres traduites de l'arabe au latin. On ne trouve nulle part ces théorèmes dans les ouvrages grecs. Les canaux historiques de cette transmission sont encore l'objet de recherches.

Ces éclairages montrent qu'une transmission ne consiste pas en un transfert immatériel et passif d'informations brutes : œuvre active d'une culture, d'une politique et d'un contexte, son contenu et son sens en sont inévitablement transformés et dépassés. En particulier, le mythe du conflit perpétuel entre recherche scientifique et dogme religieux est déconstruit. Ces éclairages sont aussi d'un grand intérêt pour l'épistémologie. Espérons une meilleure diffusion de ces nouvelles recherches, une exploration de leurs pistes et la poursuite de l'étude des milliers de manuscrits qui dorment encore dans l'ombre. ■

(1) A. I. Sabra, *Hist. Sci., 25,* 223, 1987.
(2) I. Goldziher, *The Attitude of the Old Islamic Orthodoxy toward the Ancient Sciences,* 1916.
(3) G. Saliba, *Islamic Science and the Making of the European Renaissance,* MIT Press, 2007.
(4) F. Jamil Ragep *et al., Tradition, Transmission, Transformation,* Brill, 1996.
(5) D. Gutas, *Greek Thought, Arabic Culture,* Routledge, 1998.

Les grandes contributions de l'Orient à la théorie du mouvement

Deux médecins-philosophes, le Persan Avicenne et l'Irakien Abu al-Barakat al-Baghdadi, ont contribué à l'évolution de la théorie du mouvement, conçue par Aristote près de mille trois cents ans plus tôt.

Sylvie Nony, agrégée de physique

Un moment assez particulier de l'histoire des sciences médiévales en terres d'islam a lieu aux alentours du XIIe siècle. En sciences de la nature, cette période est celle où s'est largement diffusée l'œuvre d'Avicenne (980-1037), consacrant l'autorité scientifique de celui-ci. Le philosophe et médecin persan reconstruit dans *Le Livre de la guérison* une théorie du mouvement. Celle-ci admet, comme celle d'Aristote, la nécessité d'un moteur unique pour chaque mouvement. Elle s'en différencie dans le cas où un projectile est lancé en l'air : sur ce point, Avicenne défend l'idée d'une force acquise par le mobile – une inclination – permettant la poursuite du mouvement. Avicenne repousse l'explication d'Aristote qui imaginait que l'air autour du projectile, une fois ébranlé, devient le moteur « extérieur » de cette poursuite. Il réinvestit, avec ce concept d'inclination, une thèse élaborée par le philosophe chrétien Jean Philopon (vers 490-vers 570).

Avicenne reste cependant fidèle à la tradition en réfutant la démonstration de l'existence du vide, que Philopon associait à cette inclination. Le monde d'Avicenne reste plein (et clos) comme celui d'Aristote. La présence du milieu (l'air traversé) est indispensable pour expliquer pourquoi le projectile ralentit sa course en montant. C'est cet argument que le philosophe persan oppose aux partisans du vide. Dans le vide, le mouvement se poursuivrait indéfiniment, *« ce qui est absurde ».*

INFINI SPATIAL ET TEMPOREL

La dynamique d'Avicenne a reçu, au siècle suivant, une critique radicale de la part d'un autre médecin-philosophe, Abu al-Barakat al-Baghdadi (vers 1080-vers 1165). Ce dernier a exposé, dans son ouvrage *Le Livre de la réflexion personnelle,* une thèse où il défend, contre la majorité de ses confrères, la possible existence du vide, et la nécessité de trouver d'autres explications au ralentissement du projectile lancé en l'air. Il invoque, lui aussi, une inclination violente responsable du mouvement ascendant, mais il affirme que le mobile est freiné par l'action de son inclination naturelle, son poids, qui agit dès le montant.

Il y a donc deux inclinations en compétition dans le mobile : la première à aller vers le haut, mais qui s'épuise peu à peu sous l'effet de la seconde, l'inclination naturelle à aller vers le bas, jusqu'à être dominée par elle. Lorsque commence la descente du projectile, l'inclination violente continue de s'épuiser, sans discontinuité avec le montant, justifiant que la vitesse du mobile augmente. Puis le mobile accélère encore sous l'effet de l'accumulation de cette inclination. En admettant la coexistence des inclinations, Abu al-Barakat renonce au dogme du moteur unique des aristotéliciens, admet l'existence du vide et construit une théorie permettant de rendre compte, pour la première fois, des variations de vitesse.

Sa thèse ne va pas du tout « dans le sens de l'histoire ». Mais le cadre théorique qui s'invente dans ces lignes est très important, puisqu'il assimile l'espace tridimensionnel des géomètres à celui de la physique, alors que la séparation des deux sciences est consacrée par l'orthodoxie, et ne vacillera en Occident qu'au XVIIe siècle. De plus, et contrairement à Philopon, Abu al-Barakat défend l'existence de l'infini spatial et de l'infini temporel, sans pour autant admettre les démonstrations des philosophes à propos de l'éternité du monde. Il en dénonce même avec vigueur les paralogismes et on se demande comment ce médecin juif – certes attaché tour à tour au service du calife et du sultan – a pu trouver l'audace d'une telle mise en cause. ■



L'œil du théologien

La fin d'une querelle entre institutions

Le champ de la religion évolue et admet aujourd'hui, hormis dans les milieux fondamentalistes, qu'il n'a aucune pertinence dans le champ des théories scientifiques.

François Euvé, professeur de théologie

Face à la question récurrente des rapports entre science et religion, la première chose à admettre est qu'il s'agit de deux registres de langage différents, qui reflètent deux préoccupations différentes : schématiquement, la « connaissance » et le « salut ». Pour le formuler de manière imagée, on se rappellera la parole du cardinal Baronio rapportée par Galilée dans sa lettre à Christine de Lorraine : *« Le Saint-Esprit nous dit comment on va au ciel et non comment va le ciel. »* Le théologien n'a aucune pertinence dans le champ des théories scientifiques qui, à leur tour, n'ont pas grand-chose à dire quant à l'orientation qu'il convient de donner à nos existences.

Les tentations de rapprochement ont été fréquentes. Elles peuvent le rester dans certains milieux fondamentalistes. Il suffira d'évoquer l'identification du « Big Bang », dont l'une des premières formulations se rencontre chez un prêtre catholique (ce qui a contribué à biaiser le débat), Georges Lemaître, avec le thème de la création du monde par Dieu. Lemaître fut le premier à s'opposer à un tel concordisme. On évite bien de stériles débats à tenir fermement la distinction des plans.

Ce fut d'ailleurs, peu ou prou, la position des premiers penseurs chrétiens. Pour Augustin d'Hippone (354-430), qui marqua durablement la théologie occidentale, la curiosité scientifique pour le cosmos n'est que de peu d'intérêt pour la vie chrétienne. Inutile d'aller chercher Dieu dans les étoiles ; il est dans le cœur de l'homme. L'irruption de la pensée antique aux XII[e] et XIII[e] siècles (le *Timée* de Platon dans l'École de Chartres puis la *Physique* d'Aristote dans les premières universités) modifie le paysage. On s'intéresse de nouveau à la nature. Dans les universités médiévales, la « Faculté des arts », dans laquelle on élabore une « philosophie naturelle », tente de prendre une autonomie croissante à l'égard de la Faculté de théologie, qui était censée couronner le cursus universitaire. Inutile de s'attarder sur les résistances de cette dernière à perdre son hégémonie. Il s'agit bien, comme le souligne Yves Gingras, d'un conflit d'institutions (lire p. 84).

COMITÉS D'ÉTHIQUE

Je m'arrête un instant sur la condamnation par l'évêque Tempier de 219 thèses aristotéliciennes en 1277. C'est en effet une *« revendication de la théologie à régenter le savoir »*, mais c'est aussi une critique de la cosmologie d'Aristote qui ouvre la voie à d'autres visions du cosmos. En particulier, c'est la critique, déjà émise par Jean Philopon (première moitié du VI[e] siècle), de l'idée d'un monde éternel qui ouvre la voie à celle d'un monde en histoire.

Les querelles institutionnelles ne feront que s'accentuer à l'époque moderne, sous la forme d'une polarisation à composante politique : monarchistes catholiques contre républicains laïcs. On sait à quel point l'élaboration des théories scientifiques ne peut pas échapper à son environnement socio-culturel.

Beaucoup de ces débats appartiennent au passé. La distinction des plans est assez largement admise par la majorité des théologiens chrétiens, à l'exception de quelques nostalgiques. Mais cela ne règle pas tout. Sans dériver directement des connaissances que nous délivrent des théories scientifiques toujours réfutables, la réflexion sur les valeurs qui orientent l'action ne peut pas se passer de ces connaissances. C'est d'ailleurs la fonction des comités d'éthique que de mettre en débat non pas « science » et « religion » (ou « morale ») mais des personnes de diverses disciplines et sensibilités, dont aucune ne revendique d'avoir d'emblée la réponse aux graves questions qui sont posées. Contrairement à une idée reçue, le champ de la religion est aussi en évolution… ■

Pour en savoir plus

■ François Euvé, *Science, foi, sagesse. Faut-il parler de convergence ?* L'Atelier, 2004.
■ Cyrille Michon (éd.), *Thomas d'Aquin et la controverse sur l'éternité du monde,* GF Flammarion, 2004.
■ Dominique Lambert, *Un atome d'univers : la vie et l'œuvre de Georges Lemaître*, Lessius, 2002.

Le livre du mois

Le pays qu'habitait Albert Einstein

D'Étienne Klein



« Reste-t-il encore quelque chose à dire sur Einstein ? » ai-je pensé en recevant ce livre. La vie et l'œuvre du plus célèbre physicien ayant déjà fait l'objet d'une multitude d'ouvrages, il faut s'appeler Étienne Klein pour s'attaquer à pareil Everest. En adepte des sports extrêmes, le physicien commence naturellement son parcours à vélo par une pluie battante pour *« redonner une vigueur existentielle au passé d'Einstein en parcourant à vitesse humaine le présent de l'espace terrestre »*. Il s'agit pour lui de suivre les traces européennes du génie qui bouleversa la physique, de s'attacher aux lieux et aux époques qui marquèrent son parcours intellectuel.

Le voyage commence à Aarau, en Suisse, où, à 16 ans, Einstein se demande déjà comment il percevrait la lumière s'il chevauchait un rayon lumineux. Puis vient Zurich et son Institut polytechnique, où Einstein fit ses études d'ingénieurs. En 1902, à Berne, Einstein est employé du Bureau fédéral de la propriété intellectuelle. Pour lui, la rédaction des actes de brevets est une véritable *« aubaine, […] ce travail m'obligeait à exercer mon esprit dans des domaines variés tout en m'offrant largement de quoi stimuler ma réflexion en physique »*. C'est là qu'entre mars et septembre 1905 Einstein publie cinq articles majeurs, dont l'un met en place la théorie des quanta, quand l'autre, la relativité restreinte, révolutionne les relations de l'espace et du temps. C'est l'occasion pour Étienne Klein d'exposer les idées d'Einstein. Il explique par exemple que la relativité restreinte, loin d'être une doctrine du « tout est relatif » comme on l'entend trop souvent, s'intéresse avant tout aux absolus. Ses fondations sont le principe de relativité – les lois de la physique sont identiques pour tous les observateurs en mouvement rectiligne à vitesse constante – et l'invariance de la vitesse de la lumière – sa valeur est indépendante du mouvement de la source ou de l'observateur. Si le premier de ces deux principes est une extension d'une idée remontant à Galilée, le second est vraiment nouveau. Postuler l'existence d'une vitesse absolue, c'est opérer un renversement conceptuel. Jusque-là, temps et espace forment le cadre dans lequel les événements se logent. Le temps est considéré comme une notion primitive, la vitesse comme une notion dérivée. Si le temps doit s'adapter à une vitesse, laquelle nécessite un repérage spatial, il devient « relatif » au système de référence de l'observateur. Temps et espace ne sont donc ni indépendants ni universels.

Pour détailler ces idées parfois contre-intuitives, Étienne Klein se plaît à écrire un dialogue imaginaire entre les géants de la physique que sont Galilée et Einstein. Puis arrive un épisode méconnu de la vie d'Einstein, son passage durant seize mois à Prague où, en 1912, il a l'idée que la lumière est déviée par la masse d'un corps, esquissant ainsi sa future théorie de la gravitation, la relativité générale. Il se confirme que c'est en pensée qu'Einstein réalisait des expériences simples qui questionnaient profondément la nature de l'espace, du temps ou de la lumière. *« Je n'ai pas de talent particulier. Je suis juste passionnément curieux »*, disait-il. Enfin, ultime étape sur le Vieux Continent, la ville côtière belge du Coq-sur-Mer. C'est là qu'en 1933 Einstein se réfugie sept mois avant de quitter définitivement l'Europe pour les États-Unis. On réalise alors que c'est en Europe qu'Einstein a été le plus créatif, jusqu'à ce qu'il soit contraint de la quitter. En juxtaposant différents points de vue, en tissant fragments de vie et découvertes scientifiques, Étienne Klein tente de comprendre la manière si singulière dont Einstein questionnait le monde. Il en résulte aussi l'expression d'une relation quasi intime entre l'auteur et son éminent prédécesseur : *« Qu'aurais-je fait sans Einstein ? »* se demande-t-il. ■

Roland Lehoucq, astrophysicien

Actes Sud, 256 p., 20 €.

PHYSIQUE



De l'infini

« L'infini, c'est long, surtout vers la fin », écrivait Pierre Dac. Cité par les deux auteurs astrophysiciens, cet adage met le doigt sur le vertige que nous donne la notion d'infini. L'explorant du point de vue philosophique, historique, mathématique et astronomique, cette nouvelle édition n'oublie pas les dernières découvertes en cosmologie et en physique quantique. L'infini est-il réel en physique ? Les mathématiciens ont-ils raison de le manipuler ? Quelques questions auxquelles tente de répondre cet ouvrage complet à la portée de tous.

Jean-Pierre Luminet et Marc Lachièze-Rey, *Dunod, 248 p., 19 €.*

ASTROPHYSIQUE

Dernières nouvelles des trous noirs



Au début de l'année 2016, l'astrophysicien Stephen Hawking a donné deux conférences radiophoniques sur la BBC au sujet des trous noirs, dont il est un des spécialistes mondiaux. Le texte de ces courts exposés se trouve ici publié, entrecoupé de précisions et de dessins. L'utilité et l'intérêt de ces illustrations interrogent. Le tout est sans doute trop succinct pour ceux qui connaissent un peu ces astres étranges dont rien ne s'échappe, sauf le « rayonnement de Hawking ». Mais ce texte peut cependant constituer une introduction pour les néophytes.

Stephen Hawking, *Flammarion, 112 p., 10 €.*

GÉNÉTIQUE



Réécrire la vie

Ce livre retrace l'histoire des techniques d'édition du génome, des premiers organismes génétiquement modifiés au développement de CRISPR-Cas9. À travers cet exercice, André Choulika plaide résolument en faveur de ces biotechnologies. Pour cet ex-chercheur, PDG de Cellectis, société cotée en Bourse spécialisée dans les traitements contre le cancer à base de cellules immunitaires génétiquement modifiées, *« la peur liée à l'édition du génome [...] ne repose sur aucun élément rationnel ».* Un avis qui ne manquera pas de susciter le débat.

André Choulika, *Hugo&Cie, 256 p., 17 €.*

ARCHÉOLOGIE

Les Abris du poisson et du Cap-Blanc

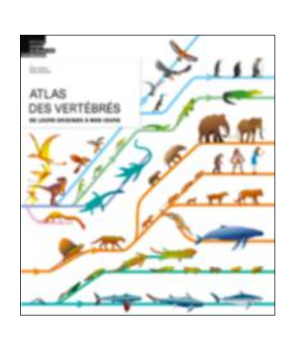


En 1909, une monumentale sculpture représentant des chevaux, des bisons et des cerfs est découverte dans une grotte de Dordogne. Trois ans plus tard, une sculpture de poisson de 1,05 mètre est mise au jour dans une autre grotte à proximité. Deux découvertes d'autant plus exceptionnelles que l'art pariétal n'est connu à l'époque que sous la forme de peintures et de gravures. Jean-Jacques Cleyet-Merle, administrateur de ces grottes et directeur du musée national de la Préhistoire des Eyzies-de-Tayac, revient en détail et en images sur ces chefs-d'œuvre du Paléolithique.

Jean-Jacques Cleyet-Merle, *Éditions du patrimoine, 72 p., 12 €.*

Beau livre

Atlas des vertébrés, de leurs origines à nos jours



Synthétiser sous la forme d'un atlas illustré l'arbre généalogique des êtres vivants, actuels et fossiles, est affaire d'organisation. Surtout si l'on veut être précis. Arthur Escher, professeur honoraire des universités de Lausanne et de Genève, et Robin Marchant, conservateur de paléontologie au musée cantonal de géologie de Lausanne ont d'abord établi une première planche pour présenter de façon globale l'ensemble des vertébrés à partir du cambrien (il y a environ 525 millions d'années). Puis, sans oublier de résumer l'arbre généalogique du vivant (à partir de 3,8 milliards d'années), ils ont constitué onze autres planches pour entrer dans le détail. Ainsi, il y a entre 350 et 230 millions d'années, les amniotes se sont scindés en deux branches : les synapsides, qui deviendront plus tard des mammifères dont les éléphants, les vaches de mer et les primates ; et les reptiles, qui donneront tortues, serpents, lézards et crocodiliens. Autant de survivants aux extinctions majeures, notamment celle survenue il y a 66 millions d'années, qui a emporté dinosaures, ptérosaures, plésiosaures... Un parcours évolutif complet et accessible à tous.

Arthur Escher et Robin Marchant, *Éditions Loisirs et Pédagogie, 36 p., 44 €.*

ÉCOLOGIE

L'homme, cet animal raté



Depuis environ 10 000 ans, *Homo sapiens* scie la branche sur laquelle il est assis. Ce terrible constat n'émane pas d'un hurluberlu inquiet du réchauffement climatique ou de l'épuisement des ressources naturelles. La démonstration vient de Pierre Jouventin, ex-directeur de recherche au CNRS, spécialiste du comportement animal. Selon lui, nous serions des animaux spécialistes du cerveau, avec une capacité étonnante à satisfaire nos pulsions cupides par de belles justifications. De quoi courir à notre extinction, totalement aveuglés.

Pierre Jouventin, *Libre&Solidaire, 240 p., 21 €.*

ÉTHOLOGIE

Depuis quand les cachalots ont le melon ?



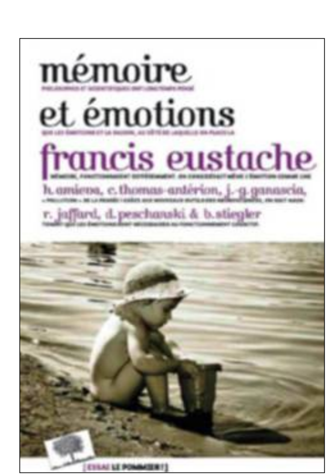
« Les mammifères, c'est mon truc, depuis maintenant plus de cinquante ans », explique en avant-propos l'auteur, Jean-Louis Hartenberger, paléontologue spécialiste des mammifères. C'est dire s'il connaît nombre d'anecdotes étonnantes sur le sujet. Vous apprendrez, entre autres, que la longue défense spiralée des narvals (en fait une canine hypertrophiée) ne leur sert pas à se défendre. C'est un organe sensoriel indispensable à leur survie qui leur permet, en particulier, d'obtenir des renseignements sur la salinité de l'eau ou de s'informer sur la météo !

Jean-Louis Hartenberger, *Belin, 224 p., 19 €.*

Neurosciences

Mémoire et Émotions

Longtemps considérées comme une « pollution de la pensée », les émotions ont une influence considérable sur la mémoire. Dans cet ouvrage collectif, les membres du conseil scientifique de l'Observatoire B2V des mémoires rendent compte des dernières recherches sur les liens qui unissent les émotions, la mémoire et les souvenirs. Et cela à plusieurs échelles : moléculaire, individuelle et collective. Vous apprendrez comment, grâce à l'imagerie cérébrale, les chercheurs ont pu mettre en évidence les bases cérébrales des émotions et de la mémoire, et la façon dont elles se régulent les unes les autres. Les émotions peuvent ainsi améliorer la mémoire… mais aussi la détraquer. Les auteurs abordent ainsi le syndrome de stress post-traumatique et dévoilent le lancement d'un projet de recherche transdisciplinaire sur les attentats du 13 novembre 2015, associant l'histoire, la sociologie, les neurosciences, la neuropsychologie et la psychiatrie. Objectif : comprendre l'interaction complexe entre mémoire individuelle et mémoire collective dans un contexte émotionnel particulièrement traumatique.



Francis Eustache (dir.), *Le Pommier, 176 p., 17 €.*

BOTANIQUE

Des hommes qui aiment les plantes

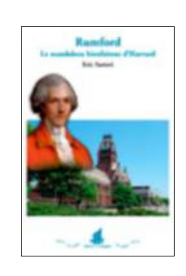


Connaissez-vous l'histoire de Charles Harrison Blackley, l'homme qui a découvert le rhume des foins ? Ou celle de Federico Delpino, botaniste italien qui a mis au jour l'existence « d'affinités sélectives » entre les fourmis et les plantes ? Cinq siècles de découvertes botaniques sont ainsi retracés par Stefano Mancuso, fondateur du Laboratoire international de neurobiologie végétale de l'université de Florence.
À travers une galerie de portraits, il présente quelques-uns de ces hommes de génie, qui ont chacun « un peu changé le monde ».

Stefano Mancuso, *Klincksieck/Les Belles Lettres, 222 p., 17 €.*

HISTOIRE DES SCIENCES

Rumford, le scandaleux bienfaiteur d'Harvard



Comment un jeune Américain né pauvre au XVIIIe siècle, qui se révèle égoïste, snob, méprisant, sarcastique et arriviste, peut-il devenir homme politique actif d'un côté comme de l'autre de l'Atlantique, doublé d'un scientifique de génie ? C'est cette histoire que raconte ici Éric Sartori, passionné d'histoire des sciences et collaborateur de *La Recherche*. Son personnage, Benjamin Thompson (comte Rumford en Europe), n'est rien moins que l'auteur de la théorie de la chaleur comme mouvement moléculaire, ce qui lui vaudra une confrontation avec Lavoisier.

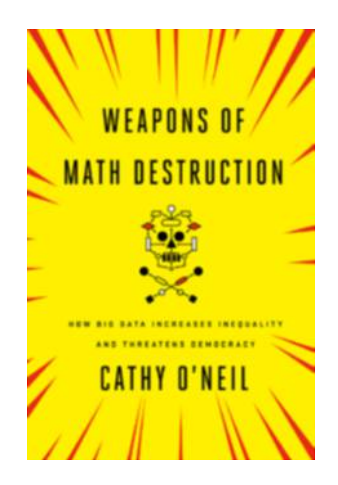
Éric Sartori, *Édition Labisquine, 336 p., 20 €.*

Lu d'ailleurs

Weapons of Math Destruction

de Cathy O'Neil

À l'heure d'Internet et du Big Data, plus personne ne s'étonne de voir les géants de l'informatique comme Google ou Facebook utiliser nos données personnelles pour nous proposer, grâce à des modèles mathématiques, des services plus ciblés. Mais comme le dénonce Cathy O'Neil dans son livre, ces mêmes modèles mathématiques sont aujourd'hui à l'œuvre dans tous les aspects de notre vie. Pour l'auteure, mathématicienne passée de Harvard au monde financier, ces modèles sont devenus de puissantes *« armes de destruction mathématiques »* car ils renforcent les inégalités. Ces outils sont bien souvent opaques : leurs méthodes de fabrication sont en général gardées secrètes. Et contrairement à ce que leurs créateurs veulent faire croire, leurs conclusions sont la plupart du temps biaisées, les algorithmes ne faisant que traduire sous forme mathématique certains préjugés, et notamment le racisme.



Nombreuses sont les victimes de ces nouvelles « armes ». Il y a ce professeur apprécié de tous qui a été licencié parce qu'un modèle fondé uniquement sur les notes aux examens de ses élèves l'a rangé dans la mauvaise catégorie (lire *La Recherche,* n° 501-502, juillet-août 2015, p. 114). Ou ces automobilistes n'ayant commis aucune infraction condamnés à payer leur assurance 1500 dollars plus cher que ceux fichés pour conduite en état d'ivresse parce qu'ils ont eu un incident de paiement. Une pratique qui récompense les riches et punit les pauvres.

Pire encore, dans certains cas, les victimes sont prises dans une spirale infernale. Par exemple, le modèle utilisé par la justice américaine pour calculer le risque de récidive (et donc la durée de la peine) prend en compte l'âge auquel la personne a été arrêtée pour la première fois. Or, à cause du délit de faciès, une personne noire est plus susceptible d'avoir été arrêtée jeune qu'une personne blanche. De ce fait, elle se verra infliger une peine de prison plus longue…

Cathy O'Neil ne fait pas que lancer un cri d'alarme. Elle demande aux modélisateurs d'assumer leurs responsabilités et aux politiques de réguler l'utilisation de ces algorithmes. *« Le problème avec ces modèles, c'est qu'ils sont optimisés pour l'efficacité et le profit, et pas pour la justice ou le bien de tous. Mais nous devons imposer des valeurs humaines à ces systèmes, même au détriment de leur efficacité. »*

Julien Bourdet, journaliste scientifique à Londres

Allen Lane, *2016, 259 p., 12,99 £.*

SOCIOLOGIE

Filles + sciences = une équation insoluble ?



Le problème abordé dans cette enquête de grande ampleur (2270 élèves de classes préparatoires interrogés) est ancien : le déficit d'orientation des filles dans les filières scientifiques de l'enseignement supérieur. Son mérite se situe dans les causes que les auteurs (trois sociologues) mettent en avant : les pressions sociales, scolaires et de genre. D'où leur appel à *« changer les mentalités des enseignants, des parents et […] à modifier les représentations que l'on se fait des disciplines scientifiques ».*

Marianne Blanchard, Sophie Orange et Arnaud Pierrel,
Éditions Rue d'Ulm, 144 p., 10 €.

ARCHÉOLOGIE

Violences de guerre, violences de masse



Du Paléolithique au génocide rwandais, des camps de concentration en Pologne aux champs de bataille de Little Big Horn (États-Unis), cet ouvrage issu d'un colloque apporte des éclairages variés (à travers le temps et l'espace) et très instructifs sur les violences et les guerres. Une manière de convaincre d'une idée – et c'est plutôt réussi : l'archéologie a joué un grand rôle dans le réexamen critique de l'histoire des conflits et de la violence armée, trop souvent présentés du point de vue des vainqueurs.

Jean Guilaine et Jacques Sémelin (dir.), *La Découverte, 400 p., 26 €.*

Lascaux 4, réplique intégrale de la grotte



À partir du 15 décembre, il sera possible de visiter la réplique intégrale de la grotte de Lascaux dans le Centre international de l'art pariétal. Découvert le 12 septembre 1940 en Dordogne par quatre adolescents, ce chef-d'œuvre de l'art préhistorique se compose de 200 mètres de salles et galeries ornées de fresques. Réalisées au paléolithique, il y a environ 17 000 ans, celles-ci représentent de nombreux animaux – chevaux, taureaux, cerfs, félins, ours, etc. – et même une figure fantastique appelée « la Licorne ». Fermée depuis 1963 pour des raisons de conservation, la grotte a été reproduite partiellement (Lascaux 2) en 1983, puis sous la forme d'une exposition itinérante (Lascaux 3) en 2012. Trois ans de travail ont été nécessaires à l'Atelier des fac-similés du Périgord pour réaliser Lascaux 4 et restituer de façon réaliste l'atmosphère de la grotte : température, humidité, et même sonorité y sont reproduites.

À partir du 15 décembre, Montignac (Dordogne), Centre international de l'art pariétal *www.projet-lascaux.com/fr/lascaux-4*

CONFÉRENCES

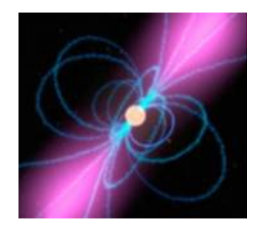
Le 1er décembre, 18 h 30
Médor forever : copier-cloner son animal

Le clonage des mammifères pourrait s'avérer rentable pour une entreprise privée et celle-ci pourrait le pratiquer sans l'aval d'un comité d'éthique. Sylvie Chastant, vétérinaire spécialiste de la reproduction, fait le point sur les pratiques autorisées dans certains pays, et sur les questions éthiques que cela soulève.

Toulouse (Haute-Garonne), muséum.
tinyurl.com/Medor-forever

Le 6 décembre, 20 h 30
Pulsars : les horloges de l'Univers

Les pulsars sont de petites étoiles tournant sur elles-mêmes. L'astronome Lucas Guillemot explique comment ces « toupies »



astrophysiques nous éclairent sur de nombreux aspects, comme les propriétés de la matière en conditions extrêmes, les effets de la relativité générale, ou encore les ondes gravitationnelles.

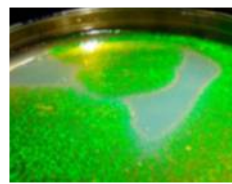
Orléans (Loiret), hôtel Dupanloup.
tinyurl.com/MardisDeLaScience-pulsars

Le 6 décembre, 20 h 30
Le Big Data en santé

Croiser des quantités massives de données, tel est le défi du Big Data. Dans le domaine de la santé, cela soulève des questions techniques, éthiques et socio-économiques. Emmanuel Bacry, mathématicien, et Claude Gissot, directeur des statistiques à la Caisse nationale d'assurance maladie, cernent les enjeux de ce partage de données sensibles.

Rennes (Ille-et-Vilaine), Espace des sciences.
tinyurl.com/espace-sciences-org-bigdata

Le 7 décembre, 17 h
L'arc-en-ciel microbien



Un groupe de recherche charentais a découvert une bactérie marine iridescente. Quels sont les mécanismes à l'œuvre ? Le biologiste Éric Rosenfeld répond à cette question et à toutes celles que ce phénomène soulève.

La Rochelle (Charente-Maritime), muséum.
www.museum-larochelle.fr/agendamuseum.html

Le 8 décembre, 18 h
Comment mieux prédire les épidémies ?

Les maladies infectieuses tuent chaque année des millions de personnes. Pour mieux les combattre, il faut comprendre leur propagation. Des chercheurs analysent les contacts entre personnes, afin d'alimenter leurs modèles. Alain Barrat, chercheur en physique statistique, montre l'intérêt de cette démarche encore récente.

Marseille (Bouches-du-Rhône), CNRS.
tinyurl.com/Jeudis-du-CNRS-epidemies

Le 8 décembre, 20 h 30
L'art rupestre, d'un continent à l'autre

L'art rupestre est inséparable de son contexte culturel. Les représentations témoignent de croyances et de visions du monde. À la lumière de traditions parvenues jusqu'à nous, le préhistorien Jean Clottes analyse et compare la diversité et les similitudes observables dans cet art.

Toulouse (Haute-Garonne), communauté municipale de santé.
http://smsp-speleo.blogspot.fr/p/blog-page.html

Le 9 décembre, 20 h
L'océan, le climat et les hommes

L'océan subit l'impact de l'augmentation du dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Le fonctionnement du couple « océan-atmosphère », qui

s'était stabilisé depuis 8000 ans, se déséquilibre. En conséquence, explique Catherine Jeandel, géochimiste et océanographe, certaines régions connaissent des évaporations plus importantes, une désalinisation des eaux ou la fonte des glaces.
Morlaix (Finistère), CCI.
tinyurl.com/ocean-climat-hommes

Le 12 décembre, 19 h
Migrations d'Afrique subsaharienne

Les migrations en provenance d'Afrique subsaharienne sont parmi les plus stigmatisées dans les débats publics, mais aussi parmi les plus méconnues. Le démographe Cris Beauchemin fait le point sur la réalité de la situation: les taux d'émigration vers l'Europe sont stables, les migrations de retour sont courantes, et le regroupement familial minoritaire.



Aubervilliers (Seine-Saint-Denis), lycée Le Corbusier.
tinyurl.com/campus-condorcet-mobilite

Le 13 décembre, 18 h
Surprenants neutrinos

Les neutrinos étonnent les physiciens. Ces particules de très faible masse traversent la matière sans laisser de trace. Comment ont-ils été découverts? Comment peut-on les détecter? Le physicien Dominique Duchesneau retrace l'histoire des recherches menées sur le sujet.
Chambéry (Savoie), présidence de l'université Savoie-Mont-Blanc.
tinyurl.com/univ-smb-fr-neutrinos
Également le 15 décembre à Cran-Gevrier (Haute-Savoie), et le 14 février à Archamps (Haute-Savoie).

Le 13 décembre, 20 h 30
Corent: nouvelles découvertes

Le plateau de Corent, en Auvergne, est un site archéologique majeur, occupé du Néolithique au début de la période romaine. Yannick Miras et Alfredo Mayoral, géoarchéologues, racontent les recherches multidisciplinaires visant à comprendre les interactions des habitants passés avec cet environnement.
Clermont-Ferrand (Puy-de-Dôme), espace multimédia Georges-Conchon.
tinyurl.com/clermont-ferrand-fr-Corent

FESTIVALS

Le 1er décembre, 17 h et 20 h
Treize Minutes

Six chercheurs disposent chacun de treize minutes de parole pour raconter leurs travaux. L'éventail des sujets présentés est large: de la physique quantique à la répartition des rôles entre hommes et femmes, en passant par la synthèse sonore ou le vieillissement du cerveau.
Marseille (Bouches-du-Rhône), BMVR Alcazar.
http://treize.lif.univ-mrs.fr/
Également diffusé en direct sur Internet.

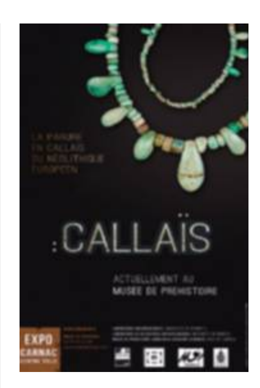
Du 2 au 4 décembre
Alimentation du futur

Découvrez ce que pourrait devenir notre alimentation dans les prochaines années. Chercheurs et industriels imaginent le menu de 2026, à partir de mélanges d'algues, d'insectes, de fromages synthétiques ou de viande cultivée en éprouvette.
Paris, Cité des sciences et de l'industrie.
tinyurl.com/cite-sciences-fr-30ans-cite

EXPOSITIONS

Jusqu'au 31 décembre
De la pierre à l'outil

Les objets en pierre taillée constituent une des sources essentielles de connaissance sur la préhistoire. Les outils présentés ici sont remis dans leur contexte géographique, chronologique et culturel. Ils témoignent de la richesse des sociétés du Paléolithique au Néolithique.
Feurs (Loire), musée archéologique. *tinyurl.com/musee-Feurs-outil*



Jusqu'au 31 décembre
Callaïs

La variscite, ou callaïs, est une pierre semi-précieuse de couleur vert clair, utilisée comme parure dans l'Antiquité. Elle a été retrouvée en grande quantité dans les tumulus de la région de Carnac. L'exposition présente 400 perles et pendentifs en variscite, accompagnés d'objets archéologiques contemporains de ces bijoux.
Carnac (Morbihan), musée de Préhistoire.
www.museedecarnac.com/fr/colloque-expo-callais.html

Viral

Du microbe au fou rire, tout s'attrape, nous explique cette exposition. Le sujet de la contagion dépasse les frontières de la biologie. Maladies, bâillements, rumeurs ou bugs informatiques: la contagion est aussi sociale ou émotionnelle. Menaçants ou bénéfiques, tous ces aspects sont explorés ici. D'abord, le monde de l'infiniment petit est passé à la loupe. Comment les micro-organismes comme les virus et les bactéries se propagent-ils? Les visiteurs sont invités à contrôler une épidémie de grippe pour comprendre ce phénomène. Place ensuite aux émotions: peut-on anticiper des réactions de masse? L'exposition se conclut en nous faisant prendre conscience de notre propre rôle dans la contagion, à travers les microbes que nous véhiculons ou les idées que nous diffusons.
Jusqu'au 27 août 2017, au Palais de la découverte, Paris. *www.palais-decouverte.fr*

Pourquoi le sel fait-il fondre la glace ?

Dès les premiers flocons, des escouades de saleuses épandent leur mixture sur la chaussée verglacée. En quelques minutes, le sel fait son œuvre et la glace fond. Pourtant, le sel est à température ambiante et n'apporte donc aucune chaleur au verglas. Dès lors, comment expliquer ce phénomène de fonte ?

Pour le comprendre, il faut se placer à l'échelle moléculaire. L'eau liquide est constituée de molécules H_2O libres de leurs mouvements. Ces molécules forment entre elles des liaisons dites « hydrogène » : les atomes d'hydrogène (H) de chaque molécule d'eau se lient aux atomes d'oxygène (O) des molécules voisines. À l'état liquide, ces liaisons, éphémères, se forment puis disparaissent aussitôt au rythme de l'agitation des molécules d'eau. Mais, lorsque la température ambiante diminue, les mouvements des molécules ralentissent et les liaisons hydrogène se forment de façon plus durable. À partir de zéro degré Celsius, les molécules d'eau adoptent une structure régulière et des cristaux de glace se forment.

Or, au contact de cette glace, le sel (chlorure de sodium, NaCl) agit comme un éléphant dans un magasin de porcelaine : il brise les liaisons hydrogène et endommage cette belle structure. Mais sous certaines conditions ! De fait, le sel sous sa forme solide – celui que l'on utilise pour relever le goût de nos plats – n'aurait aucun effet sur de l'eau tout à fait solide car il ne réagit pas tant qu'il n'est pas solubilisé. En présence d'une fine couche d'eau liquide à la surface de la glace (un micromètre d'épaisseur suffit), en revanche, le sel se dissocie en ses ions positifs et négatifs (Na^+ et Cl^-). Ils agissent alors sur la surface de la glace : les ions Na^+ attirent vers eux les paires d'électrons libres autour des atomes d'oxygène de l'eau glacée. Les ions Cl^- attirent quant à eux les atomes d'hydrogène partiellement chargés positivement. Les ions chlorure et sodium perturbent ainsi l'arrangement des liaisons hydrogène entre les molécules d'eau et entraînent leur destruction : la glace fond.

L'eau salée obtenue après la fonte possède alors une température de solidification bien inférieure à celle de l'eau pure. Comment l'explique-t-on ? Par le fait que, à zéro degré, les ions Na^+ et Cl^- s'interposent entre les molécules d'eau liquide et empêchent l'établissement de certaines liaisons hydrogène nécessaires à la formation de la glace. En fait, la présence de substances étrangères dans l'eau pure augmente le désordre moléculaire ou « entropie ». Pour réduire ce désordre et parvenir à une structure ordonnée – solide –, le seul moyen est d'abaisser la température du mélange. Une eau saturée en NaCl gèlera ainsi à -21,6 °C ! C'est ce qui permet aux routes salées de rester dégelées même si la température chute encore.

Si vous m'avez bien suivi, une question reste en suspens : par grand froid, comment obtenir la fine couche d'eau liquide nécessaire à la dissolution du sel ? Cette fine couche peut exister sous plusieurs conditions. Si la température ambiante est nulle, alors la glace et l'eau liquide coexistent et forment un mélange stable dans lequel le sel peut se dissocier. Si la température ambiante est vraiment très basse, il arrive que les camions déversent directement un mélange d'eau liquide et de sel : la saumure. Notons que l'épandage de sel sur les routes n'est pas sans conséquence sur l'environnement : il participe à l'augmentation de la salinité des aquifères. Une alternative ? Les pneus neige ! ■

Gautier Cariou

Remerciements à Didier Perret, chimiste à l'université de Genève et directeur exécutif du laboratoire de découverte et d'expérimentation Chimiscope.

ILLUSTRATION: PAUL GENDROT